FuE-Programm "Erneuerbar Mobil" des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)

Schlussbericht

Vorhabenbezeichnung:

Plug-In-, Range-Extender- und Elektrofahrzeuge unter realen Mobilitätsumständen: Infrastruktur, Umweltbedingungen und Marktakzeptanz

Laufzeit des Vorhabens:

vom: 01.01.2014 bis: 31.05.2017

Zuwendungsempfänger:

Bayerische Motoren Werke AG

Universität Duisburg-Essen

Alphabet

Universität Passau

Universität der Bundeswehr

Förderkennzeichen:16EM2015-1

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis VI

Tabellenverzeichnis XVI

1 Zusammenfassung 22

2 Zielstellung des Verbundprojektes 23

2.1.1 Gesamtziel des Verbundes 23

2.1.2 Aufgaben des Verbundpartners Universität Duisburg-Essen 23

3 Ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse des Verbundprojektes 25

3.1.1 AP 2200 Verbauanalyse, Messtechnikdefinition, -konfiguration und -test sensorbasierte Datenlogger Flotte 25

3.1.2 AP 2310 Datenübertragung und -haltung sensorbasierte Datenlogger und Smartphones 30

3.1.3 AP 2400 Datenlogging mit Smartphones (Universität Duisburg-Essen) 33

3.1.4 AP 4000 Entwicklung einer Untersuchungsmethodik für die ermittelten Forschungsfragen bezüglich Nutzerforschung Flottenkunden, Flottenmanager und CarSharing-Kunden 37

3.1.5 AP 4100 Flottenbefragung zur Ermittlung des ökologisch optimierten Flotten-Mix von Flotten-Dienstleistern und – Betreibern zur Klassifikation unterschiedlicher Flottentypen 42

3.1.6 AP 4110 Experteninterviews zur Typisierung der Grundgesamtheit und Definition eines Sets unterschiedlicher Flottentypen anhand trennscharfer Merkmale 42

3.1.7 AP 4120 Eingrenzung der Grundgesamtheit und Durchführung der Clusterung 45

3.1.8 AP 4200 Ermittlung flottenspezifischer Fahrzeuganforderungen und Nutzerpräferenzen durch Vorbefragungen sowie deren Abgleich mit den elektrifizierten Antriebskonzepten für eine effiziente Verteilung der Fahrzeuge in der Feldphase 52

3.1.9 AP 4300 Kundenincentivierung 65

3.1.10 AP 4400 Durchführung begleitender Befragungen der Fuhrparknutzer und Flottenmanager 65

3.1.11 AP 4410 Erhebung der subjektiven Daten durch die Feldphase begleitende Nachbefragungen der Fuhrparknutzer 72

3.1.12 AP 4420 Erhebung der subjektiven Daten durch die Feldphase begleitende Nachbefragungen der Flottenmanager 75

3.1.13 AP 4500 Statistische Auswertung inklusive des Abgleichs der Messdaten mit den subjektiven Daten aus den Nutzer-/ Flottenmanagerbefragungen 77

3.1.14 AP 4510 Statistische Auswertung von Befragungen der Auskunftsgruppe Fuhrparkleiter 78

3.1.15 AP 4520 Statistische Auswertung von Befragungen der Auskunftsgruppe Dienstwagennutzer 94

3.1.16 AP 4530 Statistische Auswertung von Befragungen der Auskunftsgruppe Poolfahrzeugnutzer 121

3.1.17 AP 4550 Abgleichs der Messdaten mit den subjektiven Daten aus den Nutzerbefragungen 140

3.1.18 AP 4600 Entwicklung und Anwendung eines flottenspezifischen Modells für einen ökologisch optimierten Flotten-Mix 146

3.1.19 AP 4610 Grundlegende Konzeption des Modellrahmens eines flottenspezifischen Tools für einen ökologisch optimierten Flotten-Mix 146

3.1.20 AP 4620 Flottenspezifische Modellschätzung und Anwendung des Tools im Rahmen eines Workshops für Flottenbetreiber und –dienstleister 170

3.1.21 AP 4700 Modellbasierte Prognosen auf der Basis von Szenario-Analysen mit verschiedenen umwelttechnischen und fahrzeugspezifischen Rahmenbedingungen 193

3.1.22 AP 5100 Fahrzeugaufrüstung 229

3.1.23 AP 5110 Fahrzeugaufrüstung sensorbasierte Datenlogger 229

3.1.24 AP 5200 Bereitstellung und Konfiguration von Smartphones 234

3.1.25 AP 5300 Aufbau und Bereitstellung zusätzlicher Datenlogger 234

3.1.26 AP 5500 Fahrzeugabrüstung 237

3.1.27 AP 5510 Fahrzeugabrüstung sensorbasierte Datenlogger 238

3.1.28 AP 6000 Rohdatenfilterung, -aufbereitung, -monitoring und –validierung und -auswertung 238

3.1.29 AP 6100 Monitoring Datenübertragung und Validierung 238

3.1.30 AP 6110 Monitoring Datenübertragung und Validierung sensorbasierte Datenlogger und Smartphones 239

3.1.31 AP 6200 Entwicklung und Durchführung Rohdatenfilterung und -konvertierung 246

3.1.32 AP 6210 Entwicklung und Durchführung Rohdatenfilterung und -konvertierung sensorbasierte Datenlogger und Smartphones 246

3.1.33 AP 6400 Definition, Entwicklung, Erweiterung und Durchführung von Auswertungen, sensorbasierte Datenlogger und Smartphones 262

3.1.34 AP 6500 Aufbau von Modellen zum Monitoring von Fahrzeugen, die nicht vollständig messtechnisch ausgestattet sind, um den Einsatz von Messtechnik auf das notwenige Maß zu beschränken 280

3.1.35 AP 6600 Simulationsgestützte Auswertung der gesamten Projektflotte zur Verbreiterung der Datenbasis 283

3.1.36 AP 8000 Bereitstellung von Werkzeugen zur Ermittlung optimaler Fahrzeugkonzepte für unterschiedliche Nutzergruppen 297

3.1.37 AP 8100 Entwicklung eines Werkzeugs zur Ermittlung optimaler Fahrzeugkonfigurationen für unterschiedliche Nutzergruppen 297

3.1.38 AP 8200 Entwicklung eines Werkzeugs zur Bestimmung der optimalen Zusammensetzung von Fahrzeugflotten hinsichtlich der Antriebskonzepte unter Berücksichtigung unternehmensspezifischer und umweltrelevanter Randbedingungen 301

3.1.39 AP 8300 Ableitung praxisgerechter Fahrzyklen für BEV und PHEV aus den Flottenergebnissen 309

3.1.40 AP 8400 Definition und Analyse von Zukunftsszenarien und Bewertung hinsichtlich Umwelt, Ökonomie und Technik 318

3.1.41 AP 8500 Entwicklung und Implementierung eines Algorithmus zur Zusammenführung der Analysen nach AP 8.1 - 8.4 und Einbindung weiterer Fahrdaten durch Dritte 321

4 Darstellung wesentlicher Abweichungen zum Arbeitsplan 323

5 Vergleich der Projektergebnisse zum internationalen Stand der Technik 327

6 Zukunftsaussichten und weiterer F&E-Bedarf 329

7 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) 332

8 Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses 333

9 Literaturverzeichnis 335

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gegenüberstellung der Messergebnisse einer Beispielmessung. 28

Abbildung 2: Qualitative Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Batteriestroms bei Fahrt-Nr. 3.....30

Abbildung 3: Basisanwendung der Smartphone-Applikation 33

Abbildung 4: Erweiterung der Datengrundlage durch manuelle Nutzereingaben 34

Abbildung 5: Nutzerabfrage, ob nach Beendigung der Fahrt geladen wird 34

Abbildung 6: Visualisierung einer Kurzanalyse der Fahrt und Übersicht über das Fahrtenbuch.....35

Abbildung 7: Übersicht über das Forschungsprojekt inklusive Feedback-Funktion.....35

Abbildung 8: Übersicht Untersuchungsdesign 39

Abbildung 9: Globales Zufriedenheitsurteil: Wie zufrieden sind Sie insgesamt mit Ihren Elektroautos? Befragungszeitpunkt: $t1$; $nF\ (t1) = 242$ 49

Abbildung 10: Studiendesign mit Fokus auf Arbeitspaket 4200.....53

Abbildung 11: Vorgehensweise bei der Erstkontaktaufnahme mit den Erhebungseinheiten 56

Abbildung 12: Einverständniserklärung zur Teilnahme an den Befragungen im Wortlaut 57

Abbildung 13: Anzahl aller abgeschlossenen Telefoninterviews während der Feldzeit (Erstbefragung Fuhrparkleiter).....59

Abbildung 14: Anzahl aller abgeschlossenen Onlinefragebögen während der Feldzeit (Erstbefragung Fuhrparkleiter).....59

Abbildung 15: Anzahl aller abgeschlossenen Telefoninterviews während der Feldzeit (Erstbefragung Dienstwagenfahrer).....60

Abbildung 16: Anzahl aller abgeschlossenen Onlinefragebögen während der Feldzeit (Erstbefragung Dienstwagenfahrer).....61

Abbildung 17: Anzahl aller abgeschlossenen Telefoninterviews während der Feldzeit (Erstbefragung Poolnutzer) 62

Abbildung 18: Anzahl aller abgeschlossenen Onlinefragebögen während der Feldzeit (Erstbefragung Poolnutzer) 63

Abbildung 19: Studiendesign mit Fokus auf Arbeitspaket 4400.....66

Abbildung 20: Mailvorlage zur Einladung von Poolnutzern (Zweitbefragung) 70

Abbildung 21: Ablauf der zweiten Kontaktaufnahme und des automatischen Mahnwesens.....71

Abbildung 22: Anzahl abgeschlossener Onlinefragebögen während der Feldzeit (Zweitbefragung Dienstwagennutzer) 72

Abbildung 23: Anzahl abgeschlossener Onlinefragebögen während der Feldzeit (Zweitbefragung Poolnutzer) 74

Abbildung 24: Anzahl abgeschlossener Onlinefragebögen während der Feldzeit (Zweitbefragung Fuhrparkleiter).....76

Abbildung 25: Räumliche Verteilung der Betriebe.....78

Abbildung 26: Verteilung der Fahrzeugmodelle und Antriebsarten, Befragungszeitpunkt: $t1; nF(t1) = 242.$ 79

Abbildung 27: Verteilung der Betriebe nach Anzahl von Firmen-Pkw und Anzahl von Fahrzeugnutzern, Befragungszeitpunkt: $t1; nF(t1) = 233, nF(t1) = 225.$.....79

Abbildung 28: Anschaffungsmotive, Befragungszeitpunkt: $t0; nF(t0) = 244.$.....80

Abbildung 29: Kaufkriterien Elektroauto, Befragungszeitpunkt: $t0; nF(t0) = 244.$ 81

Abbildung 30: Aspekte zur Beurteilung der Eignung eines Elektroautos, Befragungszeitpunkt: $t0; nF(t0) = 244$.....82

Abbildung 31: Anteile einfacher Streckenlängen von konventionellen Firmen-Pkw und Elektroautos im Vergleich, Befragungszeitpunkt: $t1; nF(t1) = 233$.....83

Abbildung 32: Anteile einfacher Streckenlängen, Befragungszeitpunkt: $t1; nF(t1) = 235.$ 83

Abbildung 33: Vorteile von Elektroautos, Befragungszeitpunkt: $t0, t1; nF(t0) = 247, nF(t1) = 241$.....84

Abbildung 34: Nachteile von Elektroautos, Befragungszeitpunkt: $t0, t1; nF(t0) = 247, nF(t1) = 241.$ 85

Abbildung 35: Zufriedenheitsurteile der Fuhrparkleiter für BMW i3 rein elektrisch und BMW i3 Range Extender, Befragungszeitpunkt: $t1; nF(t1) = n$.....86

Abbildung 36: Mit Elektroautos abdeckbarer Fahrtenanteil, Befragungszeitpunkt: $t1; nF(t1) = 242$.....87

Abbildung 37: Van Westendorp Reichweiten Flottenleiter, Befragungszeitpunkt: $t1; nF(t1) = 152.$ 88

Abbildung 38: Ladetechnologie in der Firma, Befragungszeitpunkt: $t1; nF(t1) = 228.$ 89

Abbildung 39: Monatliche Gesamtbetriebskosten der Projektfahrzeuge Angaben in Prozent, Befragungszeitpunkt: $t1; nF(t1) = 217$.....90

Abbildung 40: Aufpreisbereitschaft, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nF(t1) = 50$. 90

Abbildung 41: Durch Elektroauto unterstützte Zielsetzungen vs. Fuhrparkzielsetzungen, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nF(t1) = 237$.....91

Abbildung 42: Effektive Maßnahmen zur Steigerung der Attraktivität von Elektroautos, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nF(t1) = 240$.....93

Abbildung 43: Flottenzusammenstellung aktuell vs. 2020, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nF(t1) = 234$ (links), $nF(t1) = 223$ (rechts).....93

Abbildung 44: Übersicht der teilnehmenden User Chooser 94

Abbildung 45: Übersicht der Elektroauto-Modelle UC 95

Abbildung 46: Höchster beruflicher Abschluss, Befragungszeitpunkt: $t0$; $nUC(t0) = 105$. 95

Abbildung 47: Nettohaushaltseinkommen, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = 105$.....96

Abbildung 48: Zusatzleistungen über das Elektroauto hinaus, Befragungszeitpunkt: $t0$; $nUC(t0) = 106$. 98

Abbildung 49: Motiv zum Besitz eines Elektroautos, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = 104$. 99

Abbildung 50: Freedom of Choice, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = 103$. 100

Abbildung 51: Kaufkriterien Elektroauto, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = 103$.....101

Abbildung 52: Aspekte zur Beurteilung der Eignung, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = 103$. 102

Abbildung 53: Tageskilometerfahrleistung im Längsschnitt (Werktag), Befragungszeitpunkt: $t0/t1$; $nUC = 100$. 103

Abbildung 54: Jahresfahrleistung Elektroauto vs. Verbrenner, Befragungszeitpunkt: $t0/t1$; $nUC(t1) = 100$. 103

Abbildung 55: Gruppenvergleich: Anteil der (einfachen) Streckenlänge, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = 104$. *Mann-Whitney-U p-Wert: 0,043 / **p-Wert: 0,025 / ***p-Wert: 0,001 ...104

Abbildung 56: Vorteile von Elektroautos, Befragungszeitpunkt: $t0/t1$, $nUC = 105$. 105

Abbildung 57: Nachteile Elektroauto, Befragungszeitpunkt: $t0/t1$; $nUC(t1) = 104$.....106

Abbildung 58: Globale Zufriedenheit, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = n$. 107

Abbildung 59: Flexibilitätsurteil im Längsschnitt, Befragungszeitpunkt: $t0/t1$; $nUC = 101$. 108

Abbildung 60: Anteil abdeckbarer Fahrten mit dem Elektroauto, Befragungzeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = 104$. 109

Abbildung 61: Van Westendorp Reichweiten User Chooser, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = 75$. 110

Abbildung 62: Prozentualer Anteil der Fahrten ohne Range Extender: Real und Ideal, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = 47$. 111

Abbildung 63: Situationen für reinelektrisches Fahren, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = 47$. 112

Abbildung 64: Genutzte Tarife und Smart Home Lösungen, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = 66$. .113

Abbildung 65: Wichtigkeit der Ladeorte, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = 104$.....114

Abbildung 66: Ladetechnologie je Ladeort, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = n$.....114

Abbildung 67: Ausrichten des Alltags an das Elektroauto, Befragungszeitpunkt: $t0/t1$; $nUC = 101$.....116

Abbildung 68: Gesamtbetriebskosten des Elektroautos, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = 22$. 116

Abbildung 69: Kosten der Elektromobilität über Gesamtbetriebskosten hinaus, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = n$.....117

Abbildung 70: Eignung von Elektroautos als einziges Fahrzeug im Haushalt, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = n$.....118

Abbildung 71: Tipps an Personen, die ein Elektroauto fahren wollen, Befragungszeitpunkt: $t0$; $nUC(t0) = 106$. 119

Abbildung 72: Maßnahmen um Elektroautos als Dienstwagen attraktiver zu machen, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nUC(t1) = 104$. 120

Abbildung 73: Modellverteilung Flottennutzer 121

Abbildung 74: Tätigkeit im Unternehmen, Befragungszeitpunkt: $t0$; $nN(t0) = 349$. 122

Abbildung 75: Lösungen der dienstlichen Mobilität, Befragungszeitpunkt: $t0$; $nN(t0) = 360$. 124

Abbildung 76: Nutzungsmotive Flottennutzer, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nN(t1) = 326$.....125

Abbildung 77: Tageskilometerfahrleistung: Elektroauto (t1) und Verbrenner (t0) im Vergleich, Befragungszeitpunkt: $t0/t1$; $nN = 312$. 126

Abbildung 78: Tageskilometerfahrleistung: BMW i3 BEV und BMW i3 REX im Vergleich, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nN(t1) = 320$.....127

Abbildung 79: Häufigste Fahrtzwecke mit konventionellen Firmen-Pkw (t0) und Elektroautos (t1), Befragungszeitpunkt: $t0/t1$; $nN = 326$. 128

Abbildung 80: Überlegungen, bevor eine Dienstfahrt mit dem Elektroauto gestartet wird, Befragungszeitpunkt: $t0$; $nN(t0) = 358$. 129

Abbildung 81: Vorteile Elektroauto gegenüber Verbrenner-Pkw, Befragungszeitpunkt: $t0/t1$; $nN = 326$. 130

Abbildung 82: Nachteile Elektroauto gegenüber konventionellen Verbrenner-Pkw, Befragungszeitpunkt: $t0/t1$; $nN = 326$. 131

Abbildung 83: Reichweitenangst, Befragungszeitpunkt: $t0/t1$; $nN = 315$.....132

Abbildung 84: Globale Zufriedenheit, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nN(t1) = n$. 133

Abbildung 85: Flexibilitätsurteil, Befragungszeitpunkt: $t0/t1$; $nN = 326$. 134

Abbildung 86: Maßnahmen zur Flexibilitätserhöhung, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nN(t1) = 319$.....134

Abbildung 87: Anteil abdeckbarer Fahrten mit dem Elektroauto: Längsschnittanalyse, Befragungszeitpunkt: $t0/t1$; $nN = 313$. 135

Abbildung 88: Van Westendorp Reichweiten Flottennutzer, Befragungszeitpunk: $t1$; $nNt1 = 215$.....136

Abbildung 89: Prozentualer Anteil der Fahrten ohne Range Extender: Real und Ideal, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nN(t1) = 159$. 137

Abbildung 90: Wichtigkeit Ladeorte, Befragungszeitpunkt: $t1$; $nN(t1) = 326$- 138

Abbildung 91: Nutzungshäufigkeit 141

Abbildung 92: Kilometer je Werktag 142

Abbildung 93: Kilometer am Wochenende 143

Abbildung 94: Anteil Streckenlänge (Einzelfahrten) 144

Abbildung 95: Jahreskilometerfahrleistung 145

Abbildung 96: Anstieg der durchschnittlichen Pkw-Neuwagen-Preise 152

Abbildung 97: Li-Ion-Batteriekosten für Elektrofahrzeuge in US-Dollar pro kW/h (modifiziert nach Nykvist (2015), S. 330) 153

Abbildung 98: Durchschnittliche Batteriepreise 2010-2016 (McKinsey & Company (2017), S. 10).....155

Abbildung 99: Zahlungsbereitschaft für Elektrofahrzeuge (Proff (2013), S. 5) 156

Abbildung 100: Benzin- und Diesel-Nettokraftstoffpreisentwicklung in Deutschland 163

Abbildung 101: Kilowattstundenpreisentwicklung in Deutschland.....166

Abbildung 102: Auswirkungen der Szenarien auf den Dieselkraftstoffpreis pro Liter.....173

Abbildung 103: Auswirkungen der Szenarien auf die Batteriekosten pro kWh.....174

Abbildung 104: TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr mit l=48 und s=15.000.....176

Abbildung 105: TCO bei der Beschaffung einer Antriebsart über den gesamten Zeithorizont mit $n = 1$, Anschaffungszeitpunkten 2017, 2021 und 2025, $l = 48$ und $s = 15.000$ 177

Abbildung 106: Szenario 1 – TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr.....178

Abbildung 107: Szenario 2 – TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr.....181

Abbildung 108: Szenario 3 – TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr.....184

Abbildung 109: Empfohlene Kaufprämie für Elektrofahrzeuge 2021-2025.....192

Abbildung 110: Von den Erhebungseinheiten erwartete und historisch prognostizierte Strompreise....194

Abbildung 111: Erwartete Strompreise von Fuhrparkleitern ($n = 152$) und Dienstwagennutzern ($n = 49$) im Vergleich 195

Abbildung 112: Von den Erhebungseinheiten erwartete und historisch prognostizierte Dieselpreise ...196

Abbildung 113: Erwartete Strompreise von Fuhrparkleitern ($n = 158$) und Dienstwagennutzern ($n = 49$) im Vergleich 196

Abbildung 114: Erwartete Entwicklung der Kilometerkosten ($n = 121$).....198

Abbildung 115: Wertverlust von BEV- und PHEV-Modellen im Vergleich 199

Abbildung 116: Wertverlust von Verbrenner-, BEV- und PHEV-Modellen im Vergleich.....200

Abbildung 117: Angepasster Li-Ion Batteriekostenverlauf 202

Abbildung 118: Anteile von Streckenlängen mit Firmen-Pkw (n=242) 208

Abbildung 119: Verteilung der Beschaffungstypen der Dienstwagenfahrer (n=63) und Fuhrparkleiter (n=226) 210

Abbildung 120: Erwartete Dieselpreisentwicklung nach Beschaffungstyp und gruppenunspezifisch....211

Abbildung 121: Erwartete Strompreisentwicklung nach Beschaffungstyp und gruppenunspezifisch 212

Abbildung 122: TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr, Standardszenario 219

Abbildung 123: TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr, Laufzeit: 36 Monate, 10.000 km Laufleistung 221

Abbildung 124: TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr, Laufzeit 12 Monate, 15.000 km... 223

Abbildung 125: TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr, Laufzeit: 24 Monate, 15.000 km.. 223

Abbildung 126: TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr pro Fahrzeug, Standardszenario, Laufzeit: 48 Monate..... 224

Abbildung 127: Erforderliche Prämie um das Kosten-Delta zum Verbrenner-Modell auszugleichen; Standardszenario, Laufzeit: 36 Monate, Laufleistung: 15.000 km..... 227

Abbildung 128: Verteilung der Datenlogger auf unterschiedliche Fahrzeugtypen 230

Abbildung 129: Verteilung der Datenlogger auf unterschiedliche Fahrzeugmodelle..... 231

Abbildung 130: Verteilung der Datenlogger auf unterschiedliche Unternehmensgrößen..... 232

Abbildung 131: Verteilung der Datenlogger nach Fuhrparkgrößen 232

Abbildung 132: Verteilung der Datenlogger auf die Branchen der Fahrzeugflotten 233

Abbildung 133: Haupt-Modul mit Mikrocontroller und GPS- bzw. GSM-Antenne 235

Abbildung 134: Satellitensensoren Strommesszange mit Temperaturfühler (links) und Temperaturfühler (rechts). 237

Abbildung 135: Schematische Darstellung der Datenschnittstelle 239

Abbildung 136: Schematische Darstellung einer serverseitig erkannten Fahrt, welche aus Einzeldatensätzen besteht. 240

Abbildung 137: Schematischer Ablauf des Filterungs- bzw. Aufbereitungsprozesses..... 241

Abbildung 138: Signalausfall während einer aufgezeichneten Fahrt..... 242

Abbildung 139: Ablaufplan des Algorithmus zur Erkennung von zusammenhängenden Fahrten 244

Abbildung 140: Zusammengesetzte Gesamtfahrt aus zwei Einzelfahrten 245

Abbildung 141: Häufigkeitsverteilung von Fahrtbeginnen in Darstellung einer Heatmap..... 250

Abbildung 142: Verteilung der Fahrstreckenanteile aller Fahrzeuge auf die Wochentage..... 252

Abbildung 143: Verteilung der Fahrtanzahlen aller Fahrzeuge auf die Wochentage 252

Abbildung 144: Verteilung der Fahrtdauer aller Fahrzeuge auf die Wochentage 253

Abbildung 145: Durchschnittliche Fahrdistanz aller Fahrzeuge pro Fahrt 253

Abbildung 146: Kumulierte Verteilung der Einzelfahrtlängen 254

Abbildung 147: Kumulierte Verteilung der Tagesfahrleistungen 255

Abbildung 148: Anzahl der Einzelfahrten der Projektfahrzeuge an einem Werk- bzw. Wochentag 256

Abbildung 149: Tagesfahrleistung der Projektfahrzeuge an einem Werk- bzw. Wochentag 257

Abbildung 150: Nutzungshäufigkeit der Elektroautos pro Monat 258

Abbildung 151: Verteilung der Zeitpunkte an denen Einzelfahrten begonnen wurde 259

Abbildung 152: Verteilung der Fahrtanteile auf unterschiedliche Straßentypen 260

Abbildung 153: Geschwindigkeitsverteilung der Gesamtflotte 261

Abbildung 154: Ladungsbedarf der BEV bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen pro 100 Kilometer Fahrstrecke 263

Abbildung 155: Ladungsbedarf der BEV bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen und Fahrtdistanzen 264

Abbildung 156: Ladungsbedarf der BEV bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen über der durchschnittlichen Geschwindigkeit 265

Abbildung 157: Schematische Darstellung des Algorithmus zur Berechnung der Leistung der Nebenaggregate 267

Abbildung 158: Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs (Koppers et al. (2016)) 268

Abbildung 159: Berechnete Nebenverbraucherleistung im WLTC (links) und LA92-Zyklus (rechts) (Koppers et al. (2016)) 268

Abbildung 160: Erweiterung eines Projektfahrzeugs um zusätzliche Sensorik und Auswerteeinheit (Blume et al. (2017), ecomento (2013)) 271

Abbildung 161: Darstellung des Energieflusses auf dem Bordcomputer mit aktiviertem (links) und deaktiviertem (rechts) Range-Extender (Blume et al. (2017)) 271

Abbildung 162: Versuchsstrecke zur Generierung einer repräsentativen Datenbasis (Blume et al. (2017)) 272

Abbildung 163: Zeitabhängiges Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil 273

Abbildung 164: Zeitabhängiges Stromfluss und Ladungsprofil 274

Abbildung 165: Geschätzte und reale Zustände des Range Extenders während einer Fahrt 274

Abbildung 166: Schematische Darstellung des Funktionsablaufs Map-Matching 277

Abbildung 167: Beispielhafte Anordnung von GPS-Positionen auf Straßenzügen 277

Abbildung 168: Fahrprofil eines BMW i3-REX-Fahrzeugs auf unterschiedlichen Straßentypen 278

Abbildung 169: Fahrprofil eines PHEV-Fahrzeugs auf unterschiedlichen Straßentypen 279

Abbildung 170: Antriebsstränge, die im Simulationsmodell berücksichtigt werden (in Anlehnung an Koppers) 280

Abbildung 171: Schematischer Ablauf der simulationsgestützten Berechnung (Koppers) 281

Abbildung 172: Durchschnittliche Beschleunigung über Durchschnittsgeschwindigkeit (Koppers et al. (2017)) 286

Abbildung 173: Vergleich Kraftstoffbedarf vs. elektr. Fahrtstrecke für Fahrer A (Koppers et al. (2017)) 288

Abbildung 174: Vergleich Kraftstoffbedarf vs. elektr. Fahrtstrecke für Fahrer B (Koppers et al. (2017)) 288

Abbildung 175: THG-Emission vs. Energiekosten bezüglich eines ICEV für Fahrer A (Koppers et al. (2017)) 290

Abbildung 176: THG-Emission vs. Energiekosten bezüglich eines ICEV für Fahrer B (Koppers et al. (2017)) 290

Abbildung 177: Anteilige Nutzungsdauern des Range-Extenders aus Simulation 292

Abbildung 178: Emissionsausstoß in Gramm pro Kilometer für unterschiedliche Fahrzeugmodelle aus Simulation 294

Abbildung 179: Energiebedarf in kWh pro 100 Kilometer aus Simulation 295

Abbildung 180: Kilometerkosten in Euro pro 100 Kilometer aus Simulation 296

Abbildung 181: Blackbox-Modell der Fuhrpark-Optimierung 298

Abbildung 182: Fuhrpark-Optimierung mit Ein- und Ausgangsgrößen 298

Abbildung 183: Schematischer Ablauf der Flottenoptimierung 300

Abbildung 184: Grafische Benutzeroberfläche des Tools zur Flottenoptimierung 301

Abbildung 185: Ermittelte Nebenbedingungen bei der Fuhrparksoptimierung 302

Abbildung 186: Ermittelter Teilnutzen aus der Reichweite der Fahrzeuge 304

Abbildung 187: Ermittelter Teilnutzen aus den CO_2-Emissionen 304

Abbildung 188: Ermittelter Teilnutzen aus den Kilometerkosten 305

Abbildung 189: Resultat der Fuhrparkoptimierung 307

Abbildung 190: Resultat der Fuhrparkoptimierung 308

Abbildung 191: Resultat der Fuhrparkoptimierung 308

Abbildung 192: Geschwindigkeitsprofil unterteilt in Fahrtsequenzen 310

Abbildung 193: Generierter Fahrzyklus des PHEV 312

Abbildung 194: Generierter Fahrzyklus der BEV 314

Abbildung 195: Generierter Fahrzyklus der REX 316

Abbildung 196: Schematischer Ablauf der Drittnutzung der implementierten Flottenoptimierung 322

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Relative Abweichungen der Kennwerte bei Realfahrten 26

Tabelle 2: Relative Abweichungen der Kennwerte bei Realfahrten 29

Tabelle 3: Übersicht über die Datentabellen der eingesetzten MySQL-Datenbank 32

Tabelle 4: Themenbereiche der Befragungen nach Gruppen von Auskunftspersonen 41

Tabelle 5: Variablensatz des Expertenkreises zur Clusterung der Erhebungseinheiten 44

Tabelle 6: Clusteranalyse mit den Erhebungseinheiten 46

Tabelle 7: Gleichheitstest der Gruppenmittelwerte der zuvor gefundenen Clusterlösung (Diskriminanzanalyse) 47

Tabelle 8: Mittlere Ränge des globalen Zufriedenheitsurteils der Erhebungseinheiten in den gebildeten Clustern 48

Tabelle 9: Statistik zum Kruskal Wallis-Test mit den Erhebungseinheiten 48

Tabelle 10: Gleichheitstest der Gruppenmittelwerte nach Zufriedenheit der Erhebungseinheiten (Diskriminanzanalyse) 50

Tabelle 11: Themenbereiche der Erstbefragungsrunde nach Gruppen von Auskunftspersonen 54

Tabelle 12: Statistik zu den Telefoninterviews und Onlinefragebögen (Erstbefragung Fuhrparkleiter) ...60

Tabelle 13: Statistik zu den Telefoninterviews und Onlinefragebögen (Erstbefragung Dienstwagennutzer) 62

Tabelle 14: Statistik zu den Telefoninterviews und Onlinefragebögen (Erstbefragung Poolnutzer) 64

Tabelle 15: Stichprobengrößen nach Bereinigung t0 64

Tabelle 16: Themenbereiche der Zweitbefragungsrunde nach Gruppen von Auskunftspersonen 67

Tabelle 17: Statistik zur Dienstwagennutzer-Onlinebefragung (Zweitbefragung) 73

Tabelle 18: Statistik zur Poolnutzer-Onlinebefragung (Zweitbefragung) 74

Tabelle 19: Endgültige Stichprobengrößen nach t1 75

Tabelle 20: Statistik zur Fuhrparkleiter-Onlinebefragung (Zweitbefragung) 76

Tabelle 21: Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für die Nutzungshäufigkeit....141

Tabelle 22: Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für die Kilometer je Werktag und die Kilometer je Wochenende 142

Tabelle 23: Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für die Anteile (einfacher) Streckenlängen 144

Tabelle 24: Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für die Jahresfahrleistung 145

Tabelle 25: Diskontierungsfaktor pro Periode 151

Tabelle 26: Abgeleitete Batteriekosten 153

Tabelle 27: Anreize für die Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben in ausgewählten europäischen Ländern 157

Tabelle 28: Modellierung des Wertverlusts über einen Zeitraum von fünf Jahren (modifiziert nach Hölzle (2014), S.68) 159

Tabelle 29: Wertverlustentwicklung Fahrzeuge aus dem Segment Kompaktklasse 159

Tabelle 30: Entwicklung des Mehrwertsteuersatzes seit 1968 161

Tabelle 31: Prognostizierte Benzin- und Diesel-Kraftstoffpreise bis 2030 162

Tabelle 32: Vergleich der prognostizierten Kraftstoffpreise ohne Mehrwertsteuer 164

Tabelle 33: Versicherungstarife (ADAC (2016a), ADAC (2016b)) 169

Tabelle 34: Wahl der anzuschaffenden Fahrzeuge pro Jahr 171

Tabelle 35: Wahl der Laufzeit und -leistung 172

Tabelle 36: Wahl einer konstanten Kaufprämie ab 2021 172

Tabelle 37: Wahl eines Szenarios 173

Tabelle 38: Beispielhafte Darstellung der TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr für Verbrenner 175

Tabelle 39: Szenario 1 – TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr 178

Tabelle 40: Szenario 1 – TCO bei der Beschaffung einer Antriebsart über den gesamten Zeithorizont 179

Tabelle 41: Szenario 1 – Optimale Beschaffungspolitik 179

Tabelle 42: Szenario 1 – Einsparungspotential gegenüber der Beschaffung nur einer Antriebsart 180

Tabelle 43: Szenario 2 – TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr 180

Tabelle 44: Szenario 2 – TCO bei der Beschaffung einer Antriebsart über den gesamten Zeithorizont 181

Tabelle 45: Szenario 2 – Optimale Beschaffungspolitik 182

Tabelle 46: Szenario 2 – Einsparungspotential gegenüber der Beschaffung nur einer Antriebsart 183

Tabelle 47: Szenario 3 – TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr 183

Tabelle 48: Szenario 3 – TCO bei der Beschaffung einer Antriebsart über den gesamten Zeithorizont 184

Tabelle 49: Szenario 3 – Optimale Beschaffungspolitik 185

Tabelle 50: Szenario 3 – Einsparungspotential gegenüber der Beschaffung nur einer Antriebsart 186

Tabelle 51: Optimale Beschaffungspolitik der drei Szenarien 186

Tabelle 52: Auswirkungen der Laufzeitveränderungen auf die TCO bei konstanter Laufleistung 188

Tabelle 53: Auswirkungen der Laufleistungsveränderungen auf die TCO bei konstanter Laufzeit 189

Tabelle 54: TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr mit l = 36 Monate und s = 15.000 km 191

Tabelle 55: Download-Statistik der bereitgestellten Forschungsergebnisse (Stand: 30.09.2017) 192

Tabelle 56: Vergleich Wertverlust Basismodell und Datenerhebung 200

Tabelle 57: Durchschnittlicher prozentualer Wertverlust je 5.000 km Laufleistung 201

Tabelle 58: Fahrzeugdaten für die Berechnung der Kfz-Steuer 205

Tabelle 59: Versicherungskosten im Vergleich 205

Tabelle 60: Erwartete Industriestrompreise bis 2030 206

Tabelle 61: Entwicklung der Diesel- und Benzinpreise bis 2030 207

Tabelle 62: TCO je Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr, Standardszenario 213

Tabelle 63: Kumulierte TCO eines Antriebs über den gesamten Zeithorizont, Standardszenario 213

Tabelle 64: Optimale Beschaffungspolitik im Standardszenario 214

Tabelle 65: TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr, Szenario grüner Innovator 214

Tabelle 66: TCO bei der Beschaffung einer Antriebsart über den gesamten Zeithorizont, Szenario grüner Innovator 215

Tabelle 67: TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr, Szenario kostenbewusst 215

Tabelle 68: TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr, Szenario konservativ 216

Tabelle 69: TCO nach Beschaffungstypen mit Standard-Batteriepreiseinstellung 217

Tabelle 70: Kumulierte Gesamtbetriebskosten nach Beschaffungstypen und Batteriepreisszenarien .. 218

Tabelle 71: TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr, Laufzeit: 36 Monate, Laufleistung 10.000 km 220

Tabelle 72: TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr pro Fahrzeug, Laufzeit: 36 Monate, Laufleistung: 20.000 km 221

Tabelle 73: TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr je Fahrzeug, Laufzeit: 36 Monate, Laufleistung: 25.000 km 222

Tabelle 74: TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr je Fahrzeug, Laufzeit: 36 Monate, Laufleistung: 30.000 km 222

Tabelle 75: Kilometerkosten nach TCO-Modell und Erwartungen der befragten Fuhrparkleiter im Vergleich 225

Tabelle 76: Datenlogger PREMIUM – GPS-Datensatz 236

Tabelle 77: Kriterien des sogenannten Minimaldatensatzes zur Charakterisierung einer Fahrt. 247

Tabelle 78: Verteilung der Gesamtfahrleistung auf die Wochentage 250

Tabelle 79: Verteilung der Gesamtfahrleistung Wochentage bzw. Wochenende 251

Tabelle 80: Sensitivität der Durchschnittswerte der Nebenaggregate bei Ungenauigkeiten in der Parametrierung 269

Tabelle 81: Wahrheitsmatrix des trainierten neuronalen Netzes (in Anlehnung an Blume et al. (2017)) 275

Tabelle 82: Validierung des Simulationsmodells mit Verbrauchsangaben aus dem NEFZ 282

Tabelle 83: Angenommene Ladeszenarien 284

Tabelle 84: Angenommene Batteriegrößen 284

Tabelle 85: Kennwerte der Nutzerprofile (Koppers et al. (2017)) 285

Tabelle 86: Fahrbarer Fahrtstreckenanteil des BEV (Koppers et al. (2017)) 286

Tabelle 87: Angenommene THG-Emissionen für verschiedene Energieträger 289

Tabelle 88: Ermittelter Teilnutzen aus der Antriebsvariante 306

Tabelle 89: Annahmen zur Berechnung statischer Teilnutzen 306

Tabelle 90: Teilnutzen der Kriterien für alle Fahrzeugkonfigurationen 307

Tabelle 91: Parameter zur Bewertung eines Fahrverhaltens 311

Tabelle 92: Bewertungsparameter des Fahrzyklus des PHEV 313

Tabelle 93: Bewertungsparameter des Fahrzyklus der BEV 315

Tabelle 94: Bewertungsparameter des Fahrzyklus der REX 317

1 Zusammenfassung

Im Zuge des vorliegenden Abschlussberichtes wird das reale Fahr- und Nutzungsverhalten von Flottenfahrzeugen untersucht und diskutiert. Als Datengrundlage dienen subjektive Umfrageergebnisse und objektive Fahrdaten, die während einer zweistufigen Forschungsstrategie erhoben wurden. Die objektiven Fahrdaten umfassen Mobilitätsdaten von 196 größtenteils rein batterieelektrischen Fahrzeugen, die im Projektzeitraum mit eigens entwickelten Datenloggern ausgerüstet wurden. Aus den objektiven Messergebnissen geht hervor, dass die Elektrofahrzeuge vorrangig für Tagesfahrleistungen von maximal 100 Kilometern bei einer Anzahl von bis zu vier Einzelfahrten eingesetzt werden. Dabei findet ein Großteil der Fahrten im erweiterten urbanen Raum statt, so dass reine Autobahnfahrten annähernd nie angestrebt werden. Die Elektrofahrzeuge werden vornehmlich an Wochentagen aus dienstlichem Interesse bewegt, wobei etwa 41,8% der vermessenen Fahrzeuge nie an einem Wochenende verwendet wurden. Fahrten, die am Wochenende angetreten wurden, weisen jedoch tendenziell höhere Einzelfahrtstrecken auf. Abhängig von der Umgebungstemperatur kann dabei der Energiebedarf der Fahrzeuge um bis zu 50% variieren. Eine Vorkonditionierung zur Minderung des Energiebedarfs von Nebenverbrauchern stellt eine sinnvolle Maßnahme zur Steigerung der Reichweite dar. Weiterhin zeigte sich, dass eine nutzerspezifische Bewertung von geeigneten Antriebskonzepten notwendig ist, um Vorteile aus alternativen Antriebskonzepten zu erhalten.

Die Elektrofahrzeuge unterstützen die Flottenbetreiber bei wichtigen Sekundärzielen, wie der Verbesserung der Imagewirkung, der Minimierung der CO_2-Emissionen und der Reduktion von Kraftstoffkosten. Die Zufriedenheit mit den eingesetzten Elektrofahrzeugen ist bei Fuhrparkleitern, Fahrzeugpool- und Dienstwagennutzern hoch: Die Nutzer betonen besonders den Fahrspaß. Alle 3 Befragungsgruppen sind sich einig: Schon heute sind Elektrofahrzeuge für den Einsatz in den Betrieben geeignet – und zwar besonders als Poolfahrzeuge. Völlig auf die Nutzung von Verbrennern im beruflichen Alltag verzichten zu können meinen 20%. Auch bei der Flottennutzung ist der Hauptkritikpunkt an Elektrofahrzeugen die geringere Flexibilität wegen kurzer Reichweiten, langen Ladezeiten und wenig öffentlicher Ladeinfrastruktur. Als Lösung der Flexibilitätsprobleme im Berufsalltag favorisieren sowohl Fuhrparkleiter also auch Nutzer größere Batterien in den Elektrofahrzeugen. Darüber hinaus wird ein Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur gewünscht. Die Flottenbetreiber erwarten, dass Elektroautos nach 2020 auch bei den Kosten konkurrenzfähig werden. Zur Erhöhung des Kundennutzens sollten die Fahrzeuge mit größeren Batterien ausgerüstet werden, zur Verbesserung der Rahmenbedingungen wird ein Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur einer staatlichen Kaufprämie vorgezogen. 71% der Flottenbetreiber werden neue Elektrofahrzeuge in den kommenden 3 Jahren anschaffen. Der Dieselanteil in den Flotten wird zugunsten von reinelektrischen, Range Extender- und Plug In-Hybrid-Modellen schon vor 2020 signifikant abnehmen.

2 Zielstellung des Verbundprojektes

2.1.1 Gesamtziel des Verbundes

Das vorgegebene Ziel des Verbundvorhabens stellte die Formulierung von belastbaren Aussagen zu den energiewirtschaftlichen und umwelttechnischen Auswirkungen einer großen Zahl von Elektrofahrzeugen dar. Die Ergebnisse des Vorhabens sollten einerseits Anregungen für umweltpolitische Maßnahmen (wie z.B. Anreize für Elektrofahrzeug-Nutzer) zur Erreichung der Ziele der Bundesregierung zur E-Mobilität geben. Ausgehend von der erstmaligen Untersuchung des Kundennutzens und der Kundenakzeptanz auf einer breiten Basis, sollte den Herstellern auf Basis der Forschungsergebnisse Handlungsempfehlungen zur Verfügung gestellt werden, um ihre Produkte an künftige Markterfordernisse anpassen, was zur nötigen Marktdurchdringung und damit zur Sicherung von Arbeitsplätzen in Deutschland beiträgt.

2.1.2 Aufgaben des Verbundpartners Universität Duisburg-Essen

Die Universität Duisburg-Essen verantwortete in dem von ihr übernommenen Teilvorhaben des Verbundprojekts die wissenschaftliche Begleitforschung im Projektbestandteil Flottennutzung. Im Einklang mit den Zielstellungen des Verbundprojekts wurde ein zweistufiges Forschungsdesign implementiert: Neben der Erhebung realer Felddaten von Endkunden durch Datenlogger zur Ableitung von Fahrzeuganforderungen, wurden durch nutzungsbegleitende Kundenbefragungen subjektive Einschätzungen für die Flottennutzung erstmals in größerem Umfang gesammelt.

Folgende Liste gibt einen Überblick über die wichtigsten Aufgaben der Universität Duisburg-Essen im Rahmen des Verbundprojekts:

- Konzeption, Entwicklung und Umsetzung von geeigneten Datenloggern zur Aufzeichnung der objektiven Fahrdaten.
- Auf- und Abrüstung der Projektfahrzeuge mit Datenlogger während der Laufzeit des Verbundprojekts.
- Bewertung des täglichen, allgemeinen Nutzungsverhaltens der vermessenen Flottenkunden anhand objektiv aufgenommener Fahrdaten.
- Prognosen über die nutzerspezifische Zuordnung von Antriebskonzepten, ausgehend von der individuellen Mobilität der Projektteilnehmer.
- Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse zur Konzeption eines Werkzeugs zur Optimierung von Fahrzeugflotten (ökologisch optimierter Antriebs-Mix). Das Werkzeug sollte auf Grundlage festgelegter Randbedingungen eine optimale Fuhrparkkonstellation bereitstellen.
- Ermittlung des realen Energieverbrauchs unter Berücksichtigung der vorherrschenden Umweltbedingungen, wie z.B. der Umgebungstemperatur, sowie der Nutzungsweise der Fahrzeuge, u.a. durch Aufzeichnung der Fahrdynamik sowie den Umgang mit Nebenaggregaten.
- Definition möglicher Maßnahmen, um den realen Energieverbrauch zu senken.

- Festlegung eines geeigneten Untersuchungsdesigns für die begleitende subjektive Nutzerforschung im Flottenkundenbereich und die Entwicklung geeigneter Messinstrumente.
- Sammlung von Expertenwissen für eine grundlegende Segmentierung betrieblicher Flotten und zur Ableitung von Vorgaben zur Stichprobenzusammensetzung.
- Konzeption und die Umsetzung der Erst- und Zweitbefragungsrunden mit am Verbundprojekt teilnehmenden Fuhrparkleitern, Dienstwagenfahrern und Poolnutzern.
- Quantitative Auswertung des in den Erst- und Zweitbefragungsrunden generierten Datenmaterials und die Interpretation der Ergebnisse.
- Abgleich der objektiven Fahrdaten mit den subjektiven Befragungsdaten.
- Unterstützung des Verbundpartners Alphabet Fuhrparkmanagement GmbH bei der Kundenincentivierung durch die Aufbereitung und Bereitstellung von Informationen zur Begleitforschung für teilnahmeinteressierte Flottenkunden.
- Konzeption und Anwendung eines Entscheidungsmodells, das die Fahrzeugbeschaffungsentscheidungen von Fuhrparkleitern simulieren, um Aussagen darüber zu treffen, ob, und wenn ja wann, über den Einsatz von Elektrofahrzeugen ökologisch optimierte Fuhrparks realisierbar sind.
- Einbeziehung von Zukunftsszenarien und -erwartungen in die Anwendung des zuvor konzeptionierten Entscheidungsmodells.

3 Ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse des Verbundprojektes

3.1.1 AP 2200 Verbauanalyse, Messtechnikdefinition, -konfiguration und -test sensorbasierte Datenlogger Flotte

Das Ziel des Arbeitspaketes 2200 war die Anforderungs- und Machbarkeitsanalyse eines Konzeptes zur Vermessung der Flottenfahrzeuge. Anders als bei einer Erfassung der Messdaten mittels eines CAN-Loggers sollte die gesamte Datenaufzeichnung ohne Zugriff auf den CAN-Bus des Fahrzeugs erfolgen. Dieser Ansatz bietet den Vorteil, dass unabhängig vom Fahrzeughersteller ein einheitliches Messsystem eingesetzt werden kann. Die Datenbasis, die durch die Datenlogger gewonnen werden sollte, umfasste zunächst das Bewegungsprofil in Form von Ortskoordinaten und absoluter Geschwindigkeit ermittelt aus GPS-Signalen. Weiterhin wurde die Außentemperatur aufgezeichnet, um deren Einfluss auf Verbrauch und Reichweite zu erfassen. Der Energiebedarf zum Betrieb des Fahrzeugs wurde durch die Aufzeichnung des Stromflusses von und zur Traktionsbatterie ermittelt.

Zu Beginn der Planungsphase der sensorbasierten Datenlogger im Jahre 2013 erfolgte eine Recherche zu aktuell bestehenden Lösungen zur Datenaufzeichnung im Fahrzeug. Diese ergab, dass mit bereits existierenden Systemen sehr wohl das Fahrverhalten über GPS[1] sowie die Außentemperatur vermessen werden konnten. Eine Vermessung des Batteriestroms wäre allerdings mit verfügbaren Lösungen nicht realisierbar gewesen. Daher wurde entschieden, dass die Eigenkonstruktion eines Datenloggers die notwendigen Informationen bestmöglich bereitstellen könnte. Ebenfalls gewährt dies die vollständige Kenntnis über das eingesetzte System, welche besonders beim Debugging bzw. bei Reparaturarbeiten von Vorteil sein kann. Weiterhin kann dadurch die Anbindung an eine auf die Projektziele zugeschnittene Datenbankstruktur problemlos umgesetzt werden.

Um die Planung des Datenloggersystems strukturiert durchzuführen, wurden die notwendigen Spezifikationen anhand eines Lastenheftes definiert und festgehalten. Neben der Umsetzung des Messsystems sollte ebenfalls eine funktionsfähige Datenbankanbindung zur Speicherung der aufgenommenen Fahrdaten entwickelt werden. Zur schnellstmöglichen Übermittlung der erfassten Daten an den Datenserver wurde eine Datenverbindung via Mobilfunkanbindung ausgewählt. Der gesamte Datentransfer sollte mit gängigen Verschlüsselungsstandards zum Schutz vor dem Zugriff Außenstehender abgesichert werden. Die zu erfassenden Daten bestanden aus den Bewegungsdaten des Fahrzeugs via GPS-Messung, der aktuellen Außentemperatur sowie aus der Quantifizierung des Batteriestroms von und zu der Traktionsbatterie. Daher beinhaltet jeder Datensatz, der auf der Datenbank abzulegen war, die Fahrzeug-ID, den

[1] Bei der Erfassung der GPS-Daten existieren durch die wechselnden Empfangsbedingungen Einschränkungen, die besondere Maßnahmen bei der Nachbearbeitung der Daten erforderlich machen. Dies wird in diesem Dokument später diskutiert.

Zeitstempel sowie Messwerte für die GPS-Position und -geschwindigkeit, den Batteriestrom und die Außentemperatur.

Die Analyse der Einbaubedingungen bei den auszustattenden Fahrzeugmodellen ergab, dass der Verbau des Datenloggers möglichst flexibel geschehen muss, da die Platzierung der Sensorik zur Erfassung der Außentemperatur bzw. des Batteriestroms nicht vereinheitlicht werden konnte. Demzufolge wurde das Loggersystem nicht als Zusammenbaueinheit, sondern als Verbund dreier Einzelmodule vorgesehen:

- Einem Haupt-Modul, welches den Microcontroller und die GPS-Sensorik aufnimmt,
- einem Satelliten-Modul mit der Sensorik zur Erfassung der Außentemperatur und
- einem weiteren Satelliten-Modul zur Erfassung des Batteriestroms.

Die Satelliten-Module wurden über eine geeignete Schnittstelle mit dem Haupt-Modul des Datenloggers verbunden. Somit besteht die Möglichkeit, das Haupt-Modul unabhängig vom Einsatzort der externen Sensorik zu platzieren, so dass ein maximales Maß an Flexibilität und Unabhängigkeit vom Fahrzeugtyp gewonnen wurde. Damit sich das zuvor beschriebene Konzept für einen möglichen Verbau im Motorraum des Fahrzeugs sowie hinter Teilen der Cockpitverkleidung eines üblichen Fahrzeugs eignet, wurden maximale Abmessungen von 140/140/50 mm (B/H/T) für die Gehäuse der Komponenten festgelegt. Neben der äußeren Geometrie des Messsystems wurden vor allem dessen technische Spezifikation sowie die Spezifikation einer Datenschnittstelle zur Übermittlung der Fahrdaten an einen Datenserver erstellt. Um die Datenlogger autark im jeweiligen Projektfahrzeug betreiben zu können, sollte die Energieversorgung des Gesamtsystems in erster Linie durch das Bordnetz des Fahrzeugs gedeckt werden. Die Leistungsaufnahme des Messsystems durfte sich dabei nicht merklich auf die Leistungsfähigkeit des Bordnetzes auswirken, so dass eine maximale Leistungsaufnahme von 10 W im Betrieb bzw. 0 W im Ruhezustand festgelegt wurde. Das Ein- bzw. Ausschalten des Loggers muss dabei über das Zündsignal des Fahrzeugs gesteuert werden.

Die wesentliche Funktionalität eines Datenloggers – die Aufzeichnung von Daten – wird über die externe Sensorik umgesetzt. Um ausreichend genaue Messergebnisse unabhängig von äußeren Einflussfaktoren zu garantieren, wurden für die Sensoren die in Tabelle 1 genannten Kriterien festgelegt:

Tabelle 1: Relative Abweichungen der Kennwerte bei Realfahrten

Sensor	Messgröße	Betriebstemperatur	Messbereich	Anmerkung
GPS	Position	-40…85 °C	k.A.	
	Geschwindigkeit	-40…85 °C	-250…250 km/h	
Strommesszange	Batteriestrom	-40…85 °C	-400…400 A	Extern (s.u.)
Temperaturfühler	Außentemperatur	-40…85 °C	-40…85 °C	Extern (s.u.)

Alle Komponenten sind für einen Temperaturbereich von -40 bis 85 °C ausgelegt. Damit ist die Funktionsfähigkeit der Sensorik bei wechselnden und extremen Außentemperaturen garantiert. Diesen Temperaturbereich soll ebenfalls der im Zuge des Forschungsprojektes eingesetzte Temperaturfühler als Messbereich besitzen.

Das GPS-Modul soll die Möglichkeit bieten, Geschwindigkeiten bis ca. 250 km/h aufzuzeichnen, um bis zu der Höchstgeschwindigkeit aller potentiellen Projektfahrzeuge vermessen zu können. Bedingt durch die Tatsache, dass abhängig vom Nutzungs- und Fahrverhalten sowohl Energiebedarf als auch Rekuperationsleistung eines Elektrofahrzeugs stark variieren können, soll die Strommesszange Stromstärken von -400 bis 400 A vermessen können. Die Vermessung des Batteriestroms über eine Messzange besitzt den Vorteil, dass keinerlei Veränderungen an der bestehenden Elektronik des Fahrzeugs vorgenommen werden müssen. Neben den technischen Anforderungen an die Sensoren, erfolgte die Auswahl geeigneter Komponenten zudem anhand der nachfolgenden Bedingungen:

Batteriestrom:

- Strommesszange,
- klippbar,
- Energieversorgung über das Hauptmodul,
- störungssichere Datenübertragung bis zu 8 m Kabellänge,
- Hardware nach Anforderungen der Automobilindustrie.

Außentemperatur:

- Temperaturfühler an der Fahrzeugfront,
- Energieversorgung über Hauptmodul,
- störungssichere Datenübertragung bis zu 8 m Kabellänge,
- Hardware nach Anforderungen der Automobilindustrie.

Als GPS-Sensorik wurde die Hardware SIM968 der Firma „SIMCom“ eingesetzt, die ein GPS- und GSM-Modul beinhaltet. Sie gewährleistet eine Messgenauigkeit von weniger als 2,5 Metern in der Ortung und 0,1 m/s bei der Geschwindigkeitsmessung.[2] Bei dem ausgewählten Temperaturfühler handelt es sich um das DS18B20 Digitalthermometer der Firma „maxim integrated“ mit einer Genauigkeit von ± 0,5ºC in einem Messbereich von -10ºC bis 85ºC[3]. Die Strommesszange vom Typ CYHCT-C2TV- B400A-32P besitzt einen Messbereich von -400 A bis 400 A bei einer Messungenauigkeit von 1% des Messbereiches. Dabei wird der Stromfluss bidirektional vermessen.[4] Als Messfrequenz wurde für die GPS- und

[2] Vgl. SIMCom (2013), S.10

[3] Vgl. maxim integrated™ (2015), S. 2

[4] Vgl. ChenYang Technologies GmbH & Co. KG (2016), S. 1

Temperaturmessung 1 Hz festgelegt. Der Stromsensor erfasst den Stromfluss mit einer Messfrequenz von 10 Hz.

Die Validierung der Sensorik erfolgte zum einem an einem Antriebsstrang-Prüfstand und zum anderen an einem Plug-In-Hybrid-Fahrzeug der Universität Duisburg-Essen. Aus dem Forschungsprojekt „cologneE-Mobil“ konnte dabei auf CAN-Bus-Daten als Referenz zurückgegriffen werden.[5]

Antriebsstrang-Prüfstand

Der Prüfstand bestand aus einer Lithium-Ionen-Batterie, einer Asynchronmaschine einschließlich der zugehörigen Leistungselektronik als Antriebsaggregat, einem Ladegerät zur Simulation einer Range-Extender-Einheit sowie einem regelbaren Lastwiderstand zur Abbildung einer variablen Leistungsaufnahme von Nebenaggregaten. Zur Darstellung eines Fahrprofils wurde ein weiterer elektrischer Antrieb als Lastmaschine mit dem Antriebsaggregat gekoppelt.[6]

Das Ergebnis einer Beispielmessung ist in Abbildung 1 dargestellt, wobei die Messkurve, die mit BMS gekennzeichnet ist, die Messungen des Batterieprüfstandes zeigt.

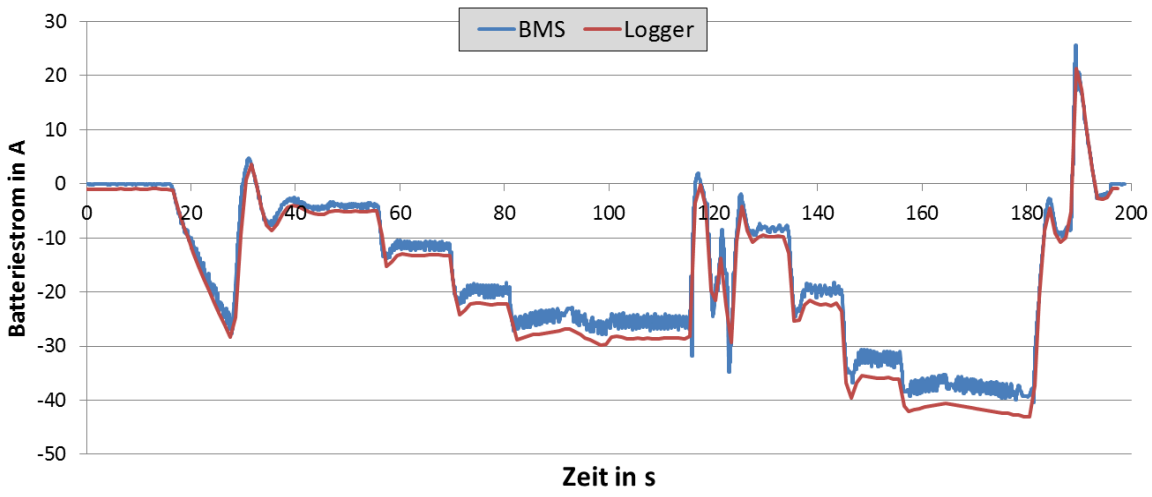


Abbildung 1: Gegenüberstellung der Messergebnisse einer Beispielmessung.

Hieraus kann eine ausreichend gute Übereinstimmung abgelesen werden. Der Verlauf beider Signale kann als annähernd identisch angesehen werden, wenngleich auch die Strommesszange des Datenloggers im negativen Messbereich systematisch kleinere Werte ausgibt. Im positiven Messbereich liefert der

[5] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017)

[6] Weitere Information können Jeschke et al. (2012) und Jeschke et al. (2013) entnommen werden.

CAN-Logger des Plug-In-Hybrids höhere Messwerte als die Strommesszange. Diese systematische Abweichung kann auf die – im Vergleich zum Messbereich des Stromwandlers – geringen Stromwerte zurückgeführt werden.

Messung während des Fahrbetriebs im Plug-In-Hybrid-Fahrzeug

Des Weiteren wurde eine Messung unter realen Betriebsbedingungen in einem Plug-In-Hybrid-Fahrzeug durchgeführt. Hierbei konnte auf die Messergebnisse des CAN-Loggers des Fahrzeugs von insgesamt zwölf Fahrten zurückgegriffen werden. Die Daten wurden aus dem zuvor angesprochenen Forschungsprojekt „colognE-Mobil“ bereitgestellt. Tabelle 2 zeigt einen Überblick der Gegenüberstellung der Messergebnisse beider Logger. Die prozentualen Angaben beschreiben die relativen Abweichungen des eingesetzten Datenloggers gegenüber den Messwerten des CAN-Loggers.

Tabelle 2: Relative Abweichungen der Kennwerte bei Realfahrten

Fahrt-Nr.	Fahrtdauer in s	Fahrt-strecke in km	Rel. Strecke	Rel. Ladung positiv	Rel. Ladung negativ	Rel. Ladung Durchfluss
1	2801	58,71	101,4%	89,5%	118,4%	95,2%
2	2441	59,81	101,9%	85,4%	116,3%	101,4%
3	1808	39,27	101,3%	90,1%	115,4%	94,2%
4	2218	40,56	101,3%	92,2%	114,2%	103,4%
5	2051	39,61	101,4%	87,2%	115,1%	102,0%
6	2108	40,16	101,1%	91,2%	113,1%	102,0%
7	949	5,21	107,2%	96,9%	109,7%	100,3%
8	2392	32,26	100,8%	86,6%	113,7%	96,7%
9	5326	128,42	101,5%	87,7%	104,7%	96,2%
10	2102	33,91	101,9%	90,0%	108,1%	99,1%
11	497	4,36	99,6%	83,2%	113,1%	100,1%

Bei den dargestellten Ladungswerten handelt es sich um die zeitliche Integration des während der Fahrt fließenden Batteriestroms. In dieser Ladungsmenge sind eventuell auftretende Messfehler bzw. Messabweichungen kumuliert enthalten. Wie bereits bei der zuvor erwähnten Messung am Prüfstand sind jedoch ebenfalls leichte Verschiebungen im zeitlichen Verlauf des Stromprofils zu beobachten (vgl. Abbildung 2).

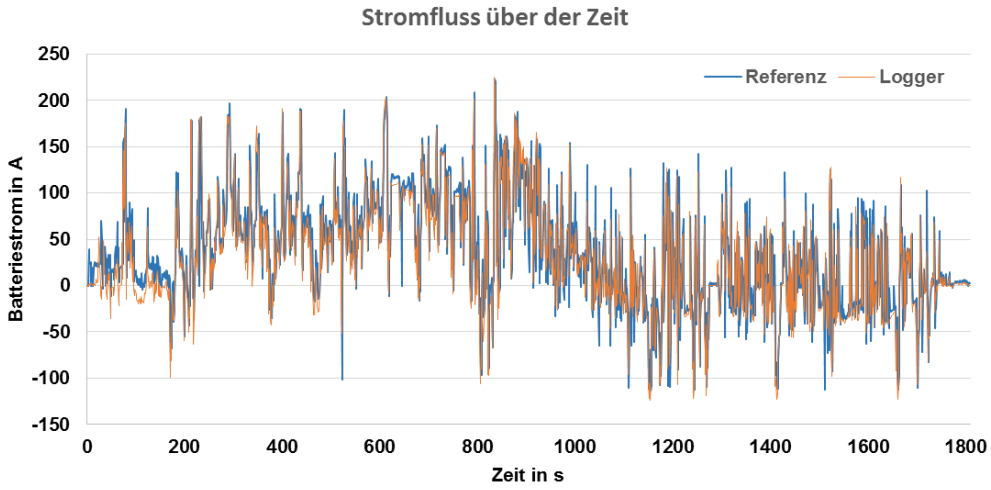


Abbildung 2: Qualitative Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Batteriestroms bei Fahrt-Nr. 3

Analog kann auch hier eine Ursache im Messbereich des Stromwandlers begründet sein, da im Zuge dieser Validierung ein Hybridfahrzeug vermessen wurde, dessen Batterieströme zu über 90 % unterhalb von 75 A liegen. Berücksichtigt man, dass die eingesetzte Strommesszange eine potentielle Messabweichung von bis zu 4 A aufweist, ergeben sich dadurch Abweichungen von bis zu 5 % bei einem Batteriestrom von 75 A. Da der Großteil der im Forschungsprojekt eingesetzten Fahrzeuge einen batterieelektrischen Antriebsstrang besitzt, dessen Batterieströme in höheren Segmenten anzusiedeln sind, lässt sich der Stromsensorik eine ausreichende Messgenauigkeit zur Erfassung der elektrischen Energie attestieren.

3.1.2 AP 2310 Datenübertragung und -haltung sensorbasierte Datenlogger und Smartphones

Die Datenübermittlung der aufgenommenen Fahrdaten wurde über eine gesicherte Datenübertragung via TSL/SSL realisiert. Nach erfolgreicher Authentifizierung des Datenloggersystems im Serversystem erfolgt ein direkter Import der aufgenommenen Fahrdaten in die Datenbank, welche MySQL als Datenbankstruktur verwendet. Um die Fahrdaten bestmöglich bereits auf dem Server aufbereiten zu können, sollte eine robuste Fehlerbehandlung der empfangenen Daten erfolgen. Dazu wird z.B. durch eine Checksummen-Überprüfung die Vollständigkeit des gerade empfangenen Datensatzes überprüft. Damit der Datenzugriff zur Auswertung unkompliziert und reibungslos verläuft, sollte eine geeignete Benutzerschnittstelle z.B. in Form eines Webinterfaces geschaffen werden. Auf diese Weise kann von allen gängigen Betriebssystemen der Zugriff gewährleistet werden. Die Struktur der Datenbank richtet sich nach den logischen Beziehungen unterschiedlicher Datentabellen. So ist z.B. eine Datentabelle, in der Informationen über den Datenlogger hinterlegt sind, mit den zum Datenlogger zugehörigen Fahrdaten über Primär- und Fremdschlüssel verknüpft. Dadurch sollte eine saubere und übersichtliche Trennung der Datenmengen, die

durch die Aktivität der Projektfahrzeuge generiert werden, erfolgen. Um die Datensicherheit auch bei einem Stromausfall zu gewährleisten, wurde eine unterbrechungsfreie Stromversorgung gefordert, so dass der Server im Bedarfsfall sauber heruntergefahren werden kann.

Die im Projekt eingesetzten Datenlogger zeichneten die zuvor aufgezeigten Fahrdaten auf und übersenden diese verschlüsselt per GSM[7]-Funknetz an einen Server an der Universität Duisburg-Essen. Der Datentransfer erfolgte, solange GSM-Empfang vorlag, während der Fahrt oder in deren Nachgang verschlüsselt an die zuvor erwähnte Serverstruktur. Als Mobilfunkanbieter wurde der Prepaid-Karten-Anbieter „Alditalk“ verwendet. Dieser besitzt den Vorteil, dass eine Aufladung des Guthabens der Prepaid-Karte online durchgeführt werden kann und durch das Kostenmodell einer Prepaid-Karte eine zuverlässige Kostenkalkulation der Datenübermittlung angestellt werden konnte. Ein Nachteil dieses Modells ist, dass nur bei ausreichendem Guthaben eine automatische Verlängerung des derzeit bestehenden Tarifs ausgeführt wird, so dass eine ständige Kontrolle der Guthabenbeträge erfolgen und bei Bedarf zeitnah eine Aufladung des Guthabens durchgeführt werden muss.

Auf Seite des Datenempfangs wurde eine auf dem Datenbankverwaltungssystem MySQL basierende Datenbank mit einer Größe von 250 GB auf einem Windows-Serversystem eingesetzt. Diese erlaubte einen schnellen Zugriff und eine unkomplizierte Verwaltung der großen Datenmenge, die in der gesamten Projektlaufzeit abgelegt wurde. Ebenfalls wurde dadurch die Möglichkeit geschaffen, unabhängig vom Betriebssystem des eingesetzten Computers von überall und zu jeder Zeit via Internet auf die Datenbasis zuzugreifen. Dieser Sachverhalt erweist sich besonders z.B. bei der Aufrüstung von Projektfahrzeugen mit Datenloggern zur echtzeitfähigen Funktionskontrolle bzw. zu Diagnosezwecken als nützlich. Die Gesamtstruktur der MySQL-Datenbank umfasst die in Tabelle 3 beschriebenen Datentabellen. Zwischen den einzelnen Datentabellen existierten vordefinierte Beziehungen, welche in Tabelle 3 über die Gliederung von oben nach unten sinnbildlich ausgedrückt werden.

[7] **G**lobal **S**ystem for **M**obile Communications

Tabelle 3: Übersicht über die Datentabellen der eingesetzten MySQL-Datenbank

Bezeichnung	Funktion
Logger	Datentabelle mit den wesentlichen Informationen zu den in den Fahrzeugen verbauten Datenloggern. Umfasst z.B. das Datum des letzten Verbindungsaufbaus sowie eine Übersicht von Fehlern im Datenloggersystem.
Connection	Datentabelle, in der die Informationen über die Datenverbindungen zwischen dem Datenlogger und dem Server protokolliert werden. Innerhalb einer existierenden Verbindung werden Fahrdaten auf dem Server abgelegt und in Rides geordnet.
Ride	Datentabelle, in der eine Schar von Fahrdaten zu einer übergeordneten Fahrt (engl. Ride) vereint wird.
Reading	Datentabelle, in der die Fahrdaten sekündlich abgelegt werden.

Auf diese Weise besitzt ein Datenlogger einen singulären Eintrag in der Tabelle „Logger“, welchem wiederum mehrere Connections zugeordnet werden. Die Connections beschreiben die Datenverbindungen, die ein Datenlogger in der Projektlaufzeit mit dem Server aufbaut. Im Zuge dieser Datenverbindungen werden die Fahrdaten (Tabelle „Reading“) in Einzelfahrten (Tabelle „Ride“) gesammelt. Somit kann ein Datenlogger mehrere Connections mit mehreren Fahrten und Fahrdaten aufweisen.

Wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, existierten unterschiedliche Datenraten bei den Messungen der eingesetzten Sensoren. Während die GPS- und Temperatursensoriken Messwerte mit einer Datenrate von 1 Hz Messwerte aufzeichneten, ermittelte die Strommesszange mit einer Messfrequenz von 10 Hz den Batteriestrom von und zur Traktionsbatterie. Um eine einheitliche Datenrate zur Speicherung der Fahrdaten zu erhalten, wurden alle zehn Messwerte, die die Strommesszange im Zuge einer Messung der übrigen Sensorik lieferte, in einem Array dem übrigen Datensatz hinzugefügt.

Bedingt durch die regen Fahrtaktivitäten der Projekteilnehmer musste die ursprüngliche Speicherkapazität und Performance der seit Projektbeginn genutzten Datenbank im Dezember 2016 durch Erwerb einer neuen Serverstruktur erhöht werden. Zu diesem Zeitpunkt war die Speicherkapazität der alten Serverstruktur mit einer Größe von 250 GB vollständig ausgelastet, wodurch die Performance des Systems merklich beeinträchtigt wurde. Fortan wurde ein System mit einer Speicherkapazität von 2 TB eingesetzt.

3.1.3 AP 2400 Datenlogging mit Smartphones (Universität Duisburg-Essen)

Das Ziel des Arbeitspaketes 2400 bestand darin, Datenlogging mit Hilfe von Smartphones zu erproben und umzusetzen. Als Alternative zu den zuvor in Abschnitt 3.1.1 aufgezeigten Datenloggern, sollten im Forschungsprojekt ebenfalls Smartphones zur Datenerfassung und -übermittlung eingesetzt werden. Dazu wurde eine Smartphone-Applikation konzeptioniert, welche die im Smartphone verbauten Sensoren verwendet, um einen reduzierten Datensatz zu erfassen. Dieser Datensatz umfasst die GPS-Messungen sowie die Messwerte der Inertialsensorik und kann bedingt durch die gesteigerte Rechenleistung heutiger Smartphones um simulationsgestützte Berechnungen erweitert werden. Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile der Smartphone-Applikation mit Hilfe von Screenshots beschrieben (vgl. Abbildung 3 bis Abbildung 7). Eine Marktanalyse im Jahr 2015 ergab, dass das Betriebssystem „Android“ zu diesem Zeitpunkt die größte Marktpräsenz und dementsprechend das größte Potential besaß. Demzufolge wurde die Smartphone-Applikation vorrangig für dieses Betriebssystem entwickelt.

Abbildung 3: Basisanwendung der Smartphone-Applikation

Basisanwendung:

- Start/Stopp der Datenaufzeichnung
- Basisanzeigen zur aktuellen Fahrt:
  - Durchschnittsgeschwindigkeit
  - Fahrtdauer
  - Fahrtstrecke
  - Effizienz des Fahrstils
  - Verfügbare Restreichweite auf Basis einer Minisimulation des batterie-elektrischen Fahrzeugs

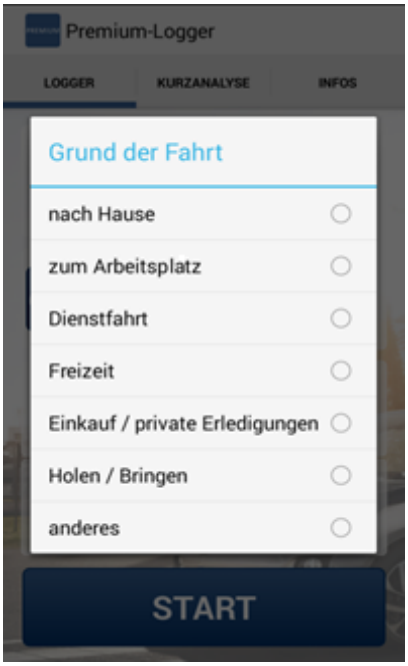


Abbildung 4: Erweiterung der Datengrundlage durch manuelle Nutzereingaben

Abfrage zu Fahrtbeginn:

- Grund der Fahrt:
  - Nach Hause
  - Zum Arbeitsplatz
  - Dienstfahrt
  - Freizeit
  - Einkauf/private Erledigungen
  - Holen/Bringen
  - Anderes

Abbildung 5: Nutzerabfrage, ob nach Beendigung der Fahrt geladen wird

Abfrage am Ende einer Fahrt:

- Vorhandensein einer Lademöglichkeit

Abbildung 6: Visualisierung einer Kurzanalyse der Fahrt und Übersicht über das Fahrtenbuch

Kurzanalyse:

- Fahrtenbuch mit Einzelfahrten
- Detailansicht jeder Fahrt möglich
- Kennwerte des gesamten Fahrtkollektivs:
  - Gesamtfahrtstrecke
  - Gesamtfahrtdauer
  - Anzahl Fahrten
  - Durchschnittliche Fahrtstrecke
  - Anteil der Fahrten, welche rein elektrisch absolviert werden konnten. Der elektrische Fahrtanteil wird auf Basis der lokal durchgeführten Minisimulation berechnet.

Abbildung 7: Übersicht über das Forschungsprojekt inklusive Feedback-Funktion

Infos:

- Möglichkeit zur Kontaktaufnahme (Feedback)
- Partner & Förderer

Neben den zuvor genannten Gründen, ist die Applikations-Entwicklung mit Android mit verhältnismäßig niedrigeren Kosten verbunden. Die Umsetzung einer iOS-App wäre ausschließlich mit einem Mac-Computer möglich gewesen. Da dieses Computer-System nicht im bestehenden PC-Pool des Lehrstuhls für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen verfügbar ist, hätte explizit für die Entwicklung der Applikation ein PC-System angeschafft werden müssen. Somit existierten wenig bzw. keine Erfahrungswerte im Umgang mit Mac-Computern, woraus ein höherer zeitlicher Aufwand für die Einarbeitungsphase zu Buche gestanden hätte. Weiterhin können Android-Apps in Programmiersprachen geschrieben werden, die bereits am Lehrstuhl für Mechatronik in der Vergangenheit Anwendung gefunden haben. Dazu zählen z.B. Objective-C und Java.

Im Gegensatz zu den festverbauten autarken Datenloggern bedarf eine Datenaufzeichnung via Smartphone eines Eingreifens des Fahrers zu Beginn und Ende einer Fahrt. Dies hat den Nachteil, dass nicht sichergestellt werden kann, dass wirklich alle durchgeführten Fahrten vollständig vermessen werden. Ebenfalls besteht die Möglichkeit, dass der Fahrer durch Beobachtung der ermittelten Daten seines derzeitigen Fahrstils diesen während einer Fahrt verändert und somit sein eigentliches Fahrverhalten verfälscht. Der damit einhergehende Reiz im Fahrbetrieb dem mitgeführten Smartphone eine erhöhte Aufmerksamkeit entgegen zu bringen ist besonders aus Gründen der Verkehrssicherheit problematisch. Einen Vorteil der Interaktion zwischen dem Fahrer und dem Datenlogger (Smartphone) stellen dagegen weitere Abfragemöglichkeiten dar, mit denen die Datengüte gesteigert werden kann. Über diese Abfrage können beispielsweise Informationen zur Ladeinfrastruktur und dem Ladeverhalten aufgenommen werden. Diese erlauben es, in Form einer späteren Offline-Auswertung ein nutzergetriebenes Ladeszenario in eine Gesamtbetrachtung miteinfließen zu lassen und folglich das gesamte Mobilitätsverhalten zu analysieren. Über ein Fahrtenbuch erhält der Nutzer einen Überblick über bzw. Einblick in sein, gegebenenfalls unbewusstes, alltägliches Fahrverhalten. Prinzipiell besteht die Möglichkeit, nach Absolvierung einer festgelegten Gesamtfahrtstrecke einen detaillierten Ergebnisbericht anzufertigen und auszugeben. Hier werden auf Grundlage des erfassten Fahrtkollektivs Simulationen verschiedener Fahrzeugkonzepte durchgeführt und deren Ergebnisse verglichen, so dass der Nutzer einen auf sich zugeschnittenen Vergleich verschiedener Antriebskonzepte vorfindet und den für sich optimalen Antrieb auswählen kann.

Aufgrund von aufwendigen, zeitintensiven Debugging- und Stabilisierungsarbeiten an der Smartphone-Applikation wurde entschieden, diese nicht über den Beta-Zustand hinaus weiter zu bearbeiten, um die wesentlichen Projektziele nicht aus den Augen zu verlieren. Besonders auftretende Inkompatibilitäten bei anderen Android-Versionen als derer, für die die Applikation entwickelt worden ist, würden deutlich mehr Entwicklungszeit sowie ein größeres Entwicklerteam erfordern. Ebenfalls erwies sich die Anbindung der Smartphone-Applikation an einen Server inklusive automatisierter Datenübertragung als fehleranfällig. Zusätzlich wurde die Umsetzung einer Android-Applikation vom Datenschutzbeauftragten der Universität Duisburg-Essen als problematisch angesehen. Dementsprechend beziehen sich alle im folgenden Abschlussbericht aufgezeigten Fahrdaten auf Messwerte, die mit Hilfe des in Abschnitt 3.1.1 vorgestellten Datenloggersystems aufgenommen wurden.

Im Zuge zukünftiger Projekte bzw. Arbeiten ist eine Weiterführung der Applikation durchaus sinnvoll und angedacht. Dazu müsste das bestehende Grundgerüst der Smartphone-Applikation an die Standards aktueller Betriebssysteme angepasst und die Fehler, die vor allem in der Anbindung an eine Serverinfrastruktur aufzufinden waren, ausgebessert werden.

3.1.4 AP 4000 Entwicklung einer Untersuchungsmethodik für die ermittelten Forschungsfragen bezüglich Nutzerforschung Flottenkunden, Flottenmanager und CarSharing-Kunden

Ziele des Arbeitspakets 4000

Ausgehend von den zuvor zu definierenden Untersuchungszielen und den daraus abgeleiteten Forschungsfragen, beinhaltet das Arbeitspaket 4000 die Festlegung eines geeigneten Untersuchungsdesigns für die begleitende Nutzerforschung im Flottenkundenbereich und die Entwicklung geeigneter Messinstrumente.

Festlegung der Untersuchungsziele und Formulierung der Forschungsfragen

Vor der Ableitung der Untersuchungsziele wurde über eine Problemdefinition der Zweck der Untersuchung festgelegt:

Die wissenschaftliche Begleitung des Einsatzes von Elektrofahrzeugen in betrieblichen Pkw-Flotten erfolgte zuvor überwiegend durch explorative Untersuchungen oder mit einer sehr begrenzten Anzahl von Projektfahrzeugen. Das Ziel war es nun, in einem großangelegten Feldversuch umfassendere Erkenntnisse über die Nutzung von Elektroautos in Pkw-Flotten zu gewinnen. Dabei sollten neben der Erhebung von Fahrdaten auch die subjektiven Einschätzungen der betroffenen Personen über einen längeren Zeitraum aufgezeichnet werden. Aus den subjektiven Einschätzungen sollten mittels eines deskriptiven Untersuchungsdesigns möglichst genaue Aussagen abgeleitet werden.

Folgende Forschungsfragen wurden auf Basis der Untersuchungsziele für die begleitende Nutzerforschung im Flottenkundenbereich abgeleitet:

- Wie groß ist das Elektrifizierungspotenzial verschiedener Pkw-Flotten?
- Welches elektrische Antriebskonzept ist für welche Flotte geeignet?
- Was sind die zentralen Akzeptanztreiber für Flottennutzer und Flottenbetreiber?
- Welche betrieblichen Motive führen zur Anschaffung von Elektroautos?
- Wie sollte eine Entscheidungshilfe für Flottenbetreiber bei der Anschaffung von Elektrofahrzeugen aussehen?
- Eignen sich Elektrofahrzeuge nur als Poolfahrzeuge oder auch als Dienstwagen?
- Welche Reichweiten sind notwendig, welche gewünscht?
- Wie erfahren die Flottennutzer die Alltagstauglichkeit?
- Wie verändern sich die subjektiven Einschätzungen im Zeitablauf?

Die auf Basis der Untersuchungsziele formulierten Forschungsfragen determinierten ihrerseits die Art des Untersuchungsdesigns und die Wahl der verwendeten Untersuchungsmethoden.

Art des Untersuchungsdesigns

Mit dem Projekt PREMIUM bot sich der Universität Duisburg-Essen die Gelegenheit, die Nutzung von Elektroautos unter realen Nutzungsumständen in Betrieben über einen Zeitraum von 36 Monaten wissenschaftlich zu begleiten. Bei der Festlegung der Art des Untersuchungsdesigns wurde aus diesem Grund eine Panel- bzw. Längsschnittuntersuchung gewählt. Charakteristisch für eine solche Panel- bzw. Längsschnittuntersuchung sind mehrere Befragungen, zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Der Vorteil ist, dass sich nicht nur die Werte verschiedener Messgrößen feststellen lassen, sondern auch deren eventuelle Veränderungen im Zeitablauf.[8]

Die entwickelte Längsschnittuntersuchung umfasst zwei Befragungsrunden: Die Erstbefragungen (AP 4200) fanden zeitnah nach der Übernahme der Projektfahrzeuge durch die Erhebungseinheiten (teilnehmende Betriebe) statt. Die Zweitbefragungen (AP 4400) folgten bei denselben Erhebungseinheiten 7 bis 9 Monate nach den Erstbefragungen. Das Untersuchungsdesign ermöglichte die Erfassung von Veränderungen des Antwortverhaltens der Befragungseinheiten im Verlauf einer mehrmonatigen Nutzungsphase. Zwischen den beiden Befragungsrunden wurden mittels der Datenlogger objektive Fahrdaten der Befragungseinheiten aufgezeichnet, u.a. um das Antwortverhalten kritisch prüfen zu können.

Die folgende Abbildung stellt das entwickelte Untersuchungsdesign für die begleitende Nutzerforschung im Flottenkundenbereich noch einmal grafisch dar:

[8] Vgl. Kuß (2012), S. 50

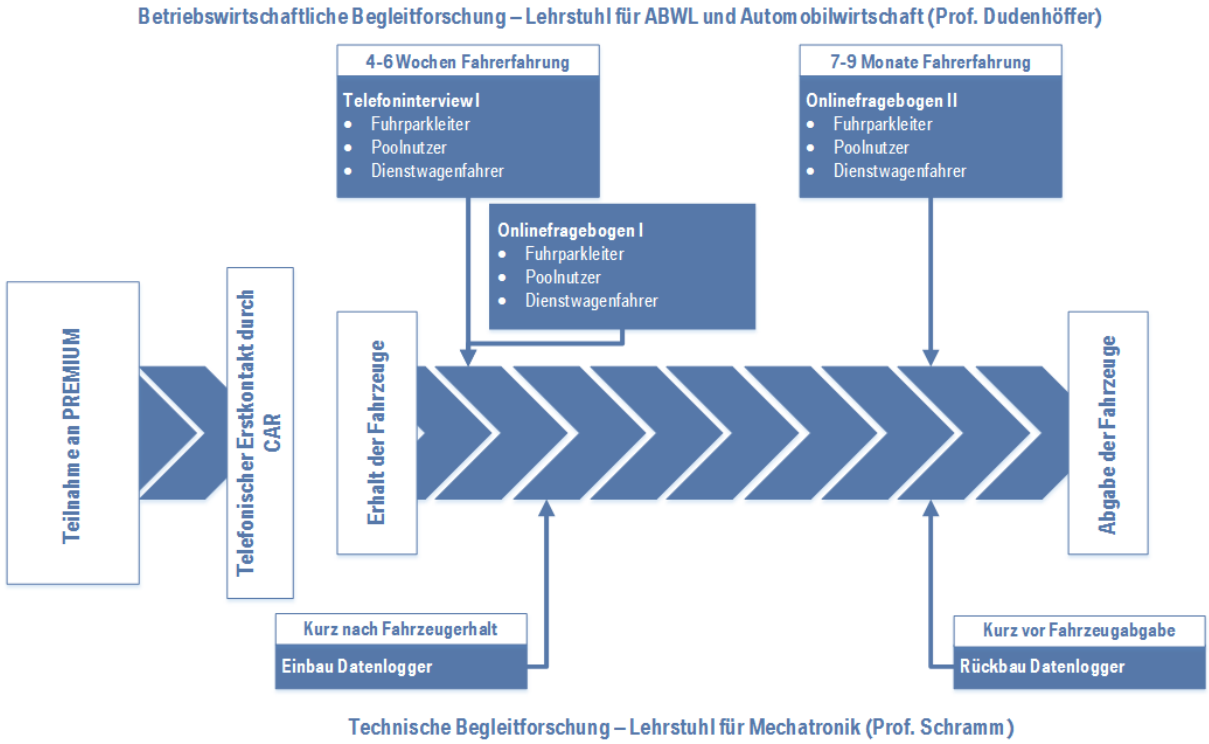


Abbildung 8: Übersicht Untersuchungsdesign

Festlegung der Untersuchungsmethoden

Wie aus Abbildung 8 ebenfalls deutlich wird, wurden Befragungen als Untersuchungsmethode ausgewählt. Befragungen gelten in der Nutzerforschung als universell einsetzbar. Außerdem werden sie gerade für Untersuchungen mit großen Stichproben wegen des gut abschätz- und planbaren Aufwands empfohlen.[9]

Als Kommunikationsformen der Befragungen wurden sowohl Telefon- als auch Online-Befragungen ausgewählt. Die geplanten Telefonbefragungen machten die Implementierung eines CATI-Systems (Computer Assisted Telephone Interview) an der Universität Duisburg-Essen notwendig. Die Online-Befragungen (Computer Assisted Web Interview) wurden schließlich über die Befragungssoftware Questback Unipark® abgewickelt.

Die Vorteile der gewählten Kommunikationsformen liegen auf der organisatorischen (kurze Untersuchungsdauer) und finanziellen (relativ geringe Kosten) Seite. Von zunächst angedachten mündlichen oder schriftlichen Befragungen vor Ort bei den Erhebungseinheiten wurde wegen der hohen Anzahl von Befragungseinheiten und deren Verteilung im gesamten Bundesgebiet frühzeitig Abstand genommen. Mit Blick

[9] Vgl. Kuß (2012), S. 58f

auf die Forschungsergebnisse kann der weitgehende Verzicht auf Vor-Ort-Besuche bei den Erhebungseinheiten rückblickend als richtige Entscheidung gelten, da diese keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn erbracht hätten.

Auswahl von Auskunftspersonen

Nach der Festlegung der Untersuchungsmethode musste entschieden werden, welche Auskunftspersonen bei den Erhebungseinheiten zur Untersuchung herangezogen werden sollten. Da die Nutzung von Elektroautos im Flottenbereich verschiedene „Stakeholder" betrifft, wurden in der Frühphase des Vorhabens 3 relevante Gruppen von Auskunftspersonen definiert:

- Fuhrparkleiter,
- Poolfahrzeugnutzer,
- Dienstwagennutzer.

Neben den Fuhrparkleitern der Befragungseinheiten nahmen damit auch eine Auswahl von Poolfahrzeugnutzern und alle Dienstwagennutzer mit Projektfahrzeugen als Auskunftspersonen an den Befragungen teil.

Entwicklung von Fragebögen

Für die begleitende Nutzerforschung im Flottenkundenbereich mussten drei gruppenspezifische Fragebogendesigns entwickelt werden, die inhaltlich zu dem Aufbau einer Längsschnittuntersuchung passten. Dafür wurden unter anderem Themenbereiche definiert, die über den Zeitverlauf der Erst- und Zweitbefragungen bei den Auskunftspersonen wiederholt abgefragt wurden.

Zur Identifikation relevanter Themenbereiche wurden in der Frühphase des Vorhabens intensive Literaturrecherchen in verschiedenen wissenschaftlichen Datenbanken angestellt. Daneben erfolgte die Einholung von Expertenwissen durch eine Gruppendiskussion mit Distriktleitern aus dem Vertrieb des Verbundpartners Alphabet Fuhrparkmanagement GmbH und Einzelinterviews mit Branchenexperten und Fuhrparkleitern.

Die Synthese der Ergebnisse erfolgte in einem zentralen Dokument, das die relevanten Themenbereiche und daraus abgeleitete Frageformulierungen dokumentiert. Im nächsten Schritt wurden die gesammelten Themenbereiche hinsichtlich ihrer Relevanz für das Vorhaben priorisiert. In einem Workshop mit anschließenden Überarbeitungsschleifen wurden die gesammelten Befragungsinhalte mit denjenigen der Verbundpartner BMW AG und Universität Passau abgeglichen (Arbeitspaket 1000). Der Abgleich beinhaltete die Festlegung der Methoden, die bei der statistischen Analyse der Ergebnisse (Arbeitspaket 4500) zum Einsatz kamen. Außerdem wurden Codierungen und Formulierungen der Forschungsfragen soweit wie möglich vereinheitlicht und anschließend in das zentrale Dokument (Forschungsplan) übernommen. Im Laufe des Vorhabens wurde der Forschungsplan regelmäßig gepflegt und mehrfach geringfügig angepasst.

Im Forschungsplan wurden die gesammelten Forschungsfragen auf die drei Gruppen von Auskunftspersonen verteilt und anschließend in verschiedene Fragebogendesigns für die Erst- und Zweitbefragungsrunden überführt. Insgesamt mussten für die drei Gruppen von Auskunftspersonen neun Fragenbogendesigns erstellt werden. Bei der Ausarbeitung der Fragebogendesigns wurde darauf geachtet, dass diese inhaltlich dem Aufbau einer Längsschnittuntersuchung und den gewählten Kommunikationsformen der Befragungen (Telefoninterviews und Online-Befragungen) gerecht wurden.

Tabelle 4 gibt eine Übersicht der Themenbereiche, die, unterteilt nach den 3 Gruppen von Auskunftspersonen, in die finalen 9 Fragenbogendesigns eingingen. Jeder Themenbereich wurde in den Fragebögen wiederum durch eine Menge unterschiedlicher Forschungsfragen operationalisiert, wovon eine Auswahl in Unterpunkten gezeigt werden:

Tabelle 4: Themenbereiche der Befragungen nach Gruppen von Auskunftspersonen

Themenbereiche der Befragungen nach Gruppen von Auskunftspersonen				
Runde	**Erhebungsform**	**Fuhrparkleiter**	**Dienstwagennutzer**	**Poolfahrzeugnutzer**
Erstbefragungsrunde (t0)	**Telefoninterview I**	• Ziele und Motive • Beschaffung • Nutzungsprofil Verbrenner	• Ziele und Motive • Beschaffung • Nutzungsprofil Verbrenner	• Ziele und Motive • Nutzungsprofil Verbrenner
	Onlinefragebogen I	• Projektfahrzeuge • Persönliche Daten Fuhrparkleiter • Flottendaten	• Projektfahrzeug • Persönliche Daten Dienstwagennutzer • Betriebsdaten	• Projektfahrzeuge • Persönliche Daten Poolfahrzeugnutzer
Zweitbefragungsrunde (t1)	**Onlinefragebogen II**	• Vor- und Nachteile • Zufriedenheit • Gesamturteil • Nutzungsprofile Elektro • Mobilitätsurteil • Ladeverhalten • Kosten • Ausblick	• Vor- und Nachteile • Zufriedenheit • Gesamturteil • Nutzungsprofile Elektro • Mobilitätsurteil • Ladeverhalten • Kosten • Ausblick	• Vor- und Nachteile • Zufriedenheit • Gesamturteil • Nutzungsprofil Elektro • Mobilitätsurteil • Ladeverhalten • Ausblick

3.1.5 AP 4100 Flottenbefragung zur Ermittlung des ökologisch optimierten Flotten-Mix von Flotten-Dienstleistern und – Betreibern zur Klassifikation unterschiedlicher Flottentypen

Ziele des Arbeitspakets 4100

Zentrales Ziel des Arbeitspakets 4100 war die Sammlung von Expertenwissen:

Die Forscher der Universität Duisburg-Essen sollten eine tiefere Vertrautheit mit dem Untersuchungsgegenstand „betriebliche Flotte“ erfahren. Mit Hilfe des generierten Expertenwissens sollten eine grundlegende Segmentierung betrieblicher Flotten und Vorgaben zur Stichprobenzusammensetzung abgeleitet werden.

3.1.6 AP 4110 Experteninterviews zur Typisierung der Grundgesamtheit und Definition eines Sets unterschiedlicher Flottentypen anhand trennscharfer Merkmale

Ziele des Arbeitspakets 4110

Die Ziele des Arbeitspakets 4110 waren die Sammlung von Expertenwissen zum Thema „betriebliche Flotten“ durch die Einbeziehung externer Fachleute und eine intensive Literaturrecherche.

Literaturrecherche

Zur Identifikation relevanter Themenbereiche und möglicher Forschungsfragen wurden in der Frühphase des Vorhabens intensive Literaturrecherchen in verschiedenen wissenschaftlichen Datenbanken durchgeführt (AP 4100). Nach Sichtung und Bewertung der gesammelten Literatur zeigte sich, dass das Material für die Forschungsziele der Nutzerforschung im Flottenkundenbereich ergänzt werden musste. Daher erfolgte die Einholung von Expertenwissen durch eine Gruppendiskussion mit Distriktleitern aus dem Vertrieb des Verbundpartners Alphabet Fuhrparkmanagement GmbH. Das gesammelte Material aus den Literaturrecherchen diente zur Vorbereitung der Gruppendiskussion und fand vielfach bei der Entwicklung des Forschungsplans (Arbeitspaket 4000) Eingang in die Befragungen.

Expertenbefragung zur Identifikation von Clustervariablen

Mit der Gruppendiskussion wurde auch eine qualitative Erhebungsmethode zur Exploration von Expertenwissen in der Frühphase des Projekts angewendet. Die Gruppendiskussion wurde gemeinsam mit dem Verbundpartner Alphabet Fuhrparkmanagement GmbH in dessen Firmenzentrale in München veranstaltet, wobei fünf Distriktleiter des Alphabet-Vertriebs den Expertenkreis bildeten.

Im Rahmen der dreistündigen Gruppendiskussion wurde der versammelte Expertenkreis u.a. darum gebeten einen Variablensatz abzuleiten:

Die Vorgabe an die Experten war dabei, solche Variablen zu benennen, die aus ihrer Sicht die Eignung einer Flotte für den Einsatz von Elektrofahrzeugen determinieren. Durch die Auswertung der Gruppendiskussion konnte ein Variablensatz aus 9 Merkmalen abgeleitet werden. Die 9 Merkmale wurden in Form von Forschungsfragen anschließend in den Forschungsplan bzw. die Fragebogendesigns integriert.

Folgende Überlegungen des Expertenkreises liegen den Merkmalsvariablen und ihren Ausprägungen zugrunde:

- Je größer das **Nutzer-Poolfahrzeug-Verhältnis**, desto leichter lassen sich im Fuhrparkbetrieb bzw. in der alltäglichen Nutzung die konzeptbedingten Nachteile von Elektrofahrzeugen ausgleichen: Für längere Fahrtenstrecken kann bspw. einfacher auf alternative Verbrenner-Pkw aus dem Fahrzeugpool zurückgegriffen werden. Während der langen Ladezeiten stehen andere Poolfahrzeuge zur Verfügung.
- Je geringer der **Dienstwagenanteil** der Flotte, desto besser lassen sich Elektrofahrzeuge in den Fuhrparkbetrieb einsetzen: Das typische Nutzungsprofil von Dienstwagen (längere Fahrtstrecken, hohe Jahreskilometerfahrleistungen) legt die konzeptbedingten Nachteile von Elektroautos eher offen als das Nutzungsprofil von Poolfahrzeugen. Außerdem sind die aktuell verfügbaren Fahrzeugmodelle für Dienstwagenberechtigte weniger attraktiv (Fahrzeuggröße, Passagier- und Gepäckkapazität, wenige Sonderausstattungen).
- Eine Flotte die **Vorerfahrungen mit Elektrofahrzeugen** in der Vergangenheit gesammelt hat, konnte wichtige Praxiserkenntnisse aus dem alltäglichen Betrieb der Fahrzeuge ziehen: Praktikable Einsatzzwecke und Nutzungsprofile für Elektrofahrzeuge in der Flotte sind bekannt. Es bestand die Möglichkeit, Vorurteile und mangelndes Wissen auszuräumen.
- Flotten, die im **städtischen Raum** betrieben werden, können in der Regel auf eine deutlich besser ausgebaute öffentliche Ladeinfrastruktur zurückgreifen. Die durchschnittlichen Fahrtstrecken von Flotten-Pkw im städtischen Raum sind erwartungsgemäß kürzer. Ein hoher Anteil von Stadtfahrten kommt Elektrofahrzeugen wegen des geringeren Energieverbrauchs und der zahlreichen Möglichkeiten zur Rekuperation entgegen.
- Flottenbetreiber, die sich als **grüne Innovatoren** bei der Beschaffung von Flotten-Pkw sehen, legen ihren Fokus weniger strikt auf Kostengrößen aus. Elektrofahrzeuge können hier die nicht direkt am Gewinn orientierten Ziele des Unternehmens und des Fuhrparkmanagements besser unterstützen.
- Wenn der Flottenbetreiber die Möglichkeit zur **eigenen Stromerzeugung** hat, lassen sich Elektrofahrzeuge im Idealfall völlig autark und auch kostengünstiger betreiben.
- Die Flottenemissionen lassen sich durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen deutlich senken. Sofern hinsichtlich der eigenen Flottenemissionen bestimmte Zielwerte vorgegeben wurden und ein Monitoring der Flottenemissionen stattfindet, können Elektrofahrzeuge dem Fuhrparkmanagement bei der Zielerreichung sehr hilfreich sein.
- Je höher der Anteil von Kurzstrecken an allen Fahrten mit Flotten-Pkw, desto weniger beeinflussen die konzeptbedingten Nachteile von Elektrofahrzeugen (Reichweite, lange Ladezeiten) deren alltäglichen Einsatz im Flottenbetrieb negativ. Real verfügbare Reichweiten von 100 km reichen auf typischen Kurzstrecken aus, außerdem kommen die Fahrzeuge mit einem höheren Ladestand zurück an den Standort, sodass auch die Ladezeiten tendenziell kürzer ausfallen.

Tabelle 5 gibt einen Überblick auf den Variablensatz des Expertenkreises. Die neun Variablen decken mit Flottendaten, Beschaffung, Ladeverhalten, Ziele und Motive und Nutzungsprofile fünf Themenbereiche der Befragungen ab:

Tabelle 5: Variablensatz des Expertenkreises zur Clusterung der Erhebungseinheiten

Variablensatz des Expertenkreises		
Themenbereich	**Merkmalsvariable**	**Merkmalsausprägungen**
Flottendaten	**Nutzer-Poolfahrzeug-Verhältnis**	>=5 Nutzer
		>=10 Nutzer
		>=15 Nutzer
	Dienstwagenanteil	Dienstwagenquote größer als 20%?
		Dienstwagenquote größer als 40%?
		Dienstwagenquote größer als 60%?
		Dienstwagenquote größer als 80%?
	Vorerfahrungen mit Elektrofahrzeuge	Vorerfahrung Elektroauto?
	Firmenstandort	Städtischer Raum?
Beschaffung	**Beschaffungstyp**	Grüner Innovator?
Ladeverhalten	**Stromerzeugung**	Strom selbst erzeugen?
Ziele/Motive	**Monitoring der Flottenemissionen**	Erhebung von CO_2 Emissionen?
Nutzungsprofile Verbrenner	**Fahrtstrecken Flottenfahrzeuge: Anteil bis 100 km einfache Strecke**	Anteil >=25%
		Anteil >=50%
		Anteil >=75%
	Fahrtstrecken Flottenfahrzeuge: Anteil mehr als 100 km bis 200 km einfache Strecke	Anteil >=25%
		Anteil >=50%
		Anteil >=75%

3.1.7 AP 4120 Eingrenzung der Grundgesamtheit und Durchführung der Clusterung

Ziele des Arbeitspakets 4120

Die Ziele des Arbeitspakets 4120 waren die Durchführung einer Clusteranalyse mit dem zuvor definierten Variablensatz zur Zerlegung der Erhebungsgesamtheit anhand von Ähnlichkeitsstrukturen in Gruppen und die Formulierung von Leitlinien zur Erhebungsgesamtheit, die dem Projektpartner Alphabet Fuhrparkmanagement GmbH als Orientierungsgrößen bei der Teilnehmerwerbung (Kunden-Incentivierung) dienten.

Durchführung der Clusterung

Die Struktur der Unterarbeitspakete des Arbeitspakets 4120 erfordert an dieser Stelle einen Vorgriff auf die Ergebnisse der Erst- und Zweitbefragungen der Gruppe Fuhrparkleiter.

Mit der Finalisierung der Stichprobenbildung bot sich die Möglichkeit zu überprüfen, ob die Zufriedenheit der Befragungseinheiten tatsächlich durch die Ausprägung des abgeleiteten Merkmalsvariablensatz beeinflusst wurde. Unter Verwendung des Variablensatzes der Experten wurde die Erhebungsgesamtheit in Gruppen (Cluster) zerlegt, sodass innerhalb einer Gruppe (Cluster) solche Betriebe zu finden waren, die sich hinsichtlich der Merkmalsausprägungen der betrachteten Variablen möglichst ähnlich sind. Die Aufteilung der Erhebungsgesamtheit in Gruppen wurde mittels einer hierarchischen Clusteranalyse in SPSS® durchgeführt, wobei das quartierte euklidische Distanzmaß für binäre Merkmalsvariablen als Proximitätsmaß Verwendung fand. Für den Fusionierungsalgorithmus wurde auf das „Average Linkage"-Clusterverfahren zurückgegriffen.[10]

Da die Clusteranalyse ein einheitliches Skalenniveau bei allen Clustervariablen erfordert, musste zur Bestimmung der Ähnlichkeiten auf eine binäre Variablenstruktur zurückgegriffen werden. Hierfür mussten zunächst die Rohdaten der betroffenen Clustervariablen umcodiert werden. Da zudem nicht bei allen Befragungseinheiten ein vollständiger Merkmalsvariablensatz aus der Feldphase vorlag, mussten 32 Befragungseinheiten aus dem Datensatz entfernt werden. Für die Durchführung der Clusteranalyse standen damit 210 Erhebungseinheiten zur Verfügung.

Die Durchführung des Clusteralgorithmus in SPSS® führte zu einer optimalen Lösung mit 3 Clustern. Tabelle 6 zeigt die Verteilung der Erhebungseinheiten auf die gebildeten Cluster:

[10] Zu den Ablaufschritten einer Clusteranalyse mit SPSS genauer: Vgl. Backhaus et al. (2011), S. 398-455.

Tabelle 6: Clusteranalyse mit den Erhebungseinheiten

		Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
Gültig	**Cluster 1**	110	52,4	52,4	52,4
	Cluster 2	7	3,3	3,3	55,7
	Cluster 3	93	44,3	44,3	100,0
	Gesamt	210	100,0	100,0	

Um herauszufinden welche Merkmalsvariablenausprägungen des von Experten gebildeten Variablensatz bei der Diskriminierung der Erhebungseinheiten in die 3 Cluster einen signifikanten Einfluss ausübten, wurde eine Diskriminanzanalyse im Anschluss an die Clusteranalyse durchgeführt. Diese Vorgehensweise ist eine häufig genutzte Möglichkeit, die Güte der Clusterung einer Erhebungsgesamtheit anhand von Merkmalen aus theoretischen und erfahrungsgestützten Überlegungen zu prüfen.[11]

Wie die Statistik zum Gleichheitstest der Gruppemittelwerte in Tabelle 7 verdeutlicht, erfolgte die Zuordnung der Erhebungseinheiten (Flotten) in die drei Cluster mit abnehmender Signifikanz anhand der Dienstwagenquote (insbesondere ab einem Dienstwagenanteil von mehr als 60%) der Flotte, der Fahranteile der Flotten-Pkw unter 100 km einfache Strecke bzw. über 100 km einfache Strecke, des Beschaffungstyps grüner Innovator und des Nutzer-Poolfahrzeugverhältnis. Nicht signifikant zur Zuordnung der Erhebungseinheiten in die Cluster haben dagegen die Erhebung von CO_2-Emissionen, der Flottenstandort, die Vorerfahrung mit Elektrofahrzeugen und die eigene Stromerzeugung beigetragen.

Tabelle 7 enthält die Ergebnisse des Gleichheitstests der Gruppenmittelwerte für die zuvor gefundene Clusterlösung unter Verwendung des gesamten Variablensatz des Expertenkreises. Signifikante Einflüsse zur Zuordnung der Erhebungseinheiten in die drei Cluster sind durch hochgestellte Zahlen gekennzeichnet:

[11] Zur Anwendung von Diskriminanzanalysen für die Prüfung von Clusteranalysen und allgemein genauer: Vgl. Backhaus et al. (2011), S. 188-248.

Tabelle 7: Gleichheitstest der Gruppenmittelwerte der zuvor gefundenen Clusterlösung (Diskriminanzanalyse)

Gleichheitstest der Gruppenmittelwerte			
Merkmalsvariable	**Merkmalsausprägung**	**F**	**Signifikanz**
Nutzer-Poolfahrzeug-Verhältnis	>=5 Nutzer	21,223	,000[1]
	>=10 Nutzer	4,573	,011[2]
	>=15 Nutzer	3,350	,037[3]
Dienstwagenanteil	Dienstwagenquote größer als 20%	115,000	,000[4]
	Dienstwagenquote größer als 40%	364,181	,000[5]
	Dienstwagenquote größer als 60%	708,447	,000[6]
	Dienstwagenquote größer als 80%	127,259	,000[7]
Vorerfahrung Elektroauto	Vorerfahrung Elektroauto	,986	,375
Beschaffungstyp	Grüner Innovator	5,843	,003[8]
Stromerzeugung	Strom selbst erzeugen?	,301	,741
Flotten-Emissionsmonitoring	Erhebung von CO^2 Emissionen	2,574	,079
Fahrtstrecken Flottenfahrzeuge: Anteil bis 100 km einfache Strecke	Anteil >=25%	16,727	,000[9]
	Anteil >=50%	20,378	,000[10]
	Anteil >=75%	9,627	,000[11]
Fahrtstrecken Flottenfahrzeuge: Anteil mehr als 100 km bis 200 km einfache Strecke	Anteil >=25%	5,745	,004[12]
	Anteil >=50%	3,664	,027[13]
	Anteil >=75%	.[a]	.[a]
Firmenstandort	Städtischer Raum?	1,380	,254
[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13] Signifikant bei Signifikanzniveau von 95%; .a Kann nicht berechnet werden, da Konstante.			

Die Maßgabe an den Expertenkreis bei der Auswahl des Variablensatzes war, genau solche Merkmale von Erhebungseinheiten (Flotten) zu benennen, anhand derer sich für den Einsatz von Elektrofahrzeugen besonders geeignete Flotten von weniger geeigneten unterscheiden lassen. Unter Verwendung der globalen Zufriedenheitsurteile der befragten Fuhrparkleiter – als ein Maß für die Eignung einer Flotte für den

Einsatz von Elektrofahrzeugen – kann der Variablensatz der Experten retrospektiv geprüft werden. Hierfür wurde ein Kruskal-Wallis-Test durchgeführt.[12]

Tatsächlich ergeben sich beim Vergleich der Rangsummen des globalen Zufriedenheitsurteils zwischen den drei Clustern signifikante Unterschiede. Die Zerlegung der Erhebungsgesamtheit anhand des von Experten definierten Variablensatzes führt demnach tatsächlich zu drei Clustern, die sich hinsichtlich ihrer Zufriedenheit mit den Elektrofahrzeugen signifikant unterscheiden. Die Tabelle 8 undTabelle 9 zeigen die mittleren Ränge für das globale Zufriedenheitsurteil mit den Elektrofahrzeugen in den drei Clustern der Erhebungsgesamtheit (Fuhrparkleiter-Stichprobe) sowie die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Test zum Nachweis der signifikanten Unterschiede im Zufriedenheitsurteil.

Tabelle 8: Mittlere Ränge des globalen Zufriedenheitsurteils der Erhebungseinheiten in den gebildeten Clustern

Ränge			
Average Linkage (Between Groups)		**N**	**Mittlerer Rang**
Zufriedenheit_Global	**Cluster 1**	110	95,14
	Cluster 2	7	109,36
	Cluster 3	93	117,46
	Gesamt	210	

Tabelle 9: Statistik zum Kruskal-Wallis-Test mit den Erhebungseinheiten

Statistik für Kruskal-Wallis-Test[a]	
Variable	Zufriedenheit_Global
Chi-Quadrat	8,415
Asymptotische Signifikanz	,015[1]
[1] Signifikant bei Signifikanzniveau von 95% a. Gruppenvariable: Average Linkage (Between Groups)	

Ziel war es, durch den von Experten ausgewählten Variablensatz solche Pkw-Flotten von anderen zu trennen, die sich für den Einsatz von Elektrofahrzeugen besser bzw. weniger gut eignen. Der Vergleich der globalen Zufriedenheitsurteile der befragten Fuhrparkleiter in den drei gebildeten Clustern ergab, dass

[12] Zur Anwendung des Kruskal Wallis-Test genauer: Vgl. Sachs (2013), S. 238ff

der Variablensatz tatsächlich trennscharfe Merkmale enthält, um die Erhebungsgesamtheit hinsichtlich der Eignung verschiedener Flottentypen für Elektrofahrzeuge einzuteilen.

Darüber hinaus erschien es interessant zu erfahren, welche Merkmale bzw. Merkmalsausprägungen des Variablensatzes als Zufriedenheitstreiber gelten können, und auf welche man bei der Weiterverwendung der hier präsentierten Erkenntnisse – bspw. für eine Segmentierung des Flottenmarktes – verzichten könnte. Daher wurde zuletzt eine weitere Diskriminanzanalyse durchgeführt.

Hierfür wurde die Erhebungsgesamtheit anhand des globalen Zufriedenheitsurteils der Fuhrparkleiter aufgetrennt. Jede Zufriedenheitskategorie bildete dabei eine Gruppe (Cluster). Abbildung 9 zeigt die prozentuale Verteilung der Erhebungseinheiten über die abgefragten Zufriedenheitskategorien während der Zweitbefragungsrunde (t_1) der Fuhrparkleiter:

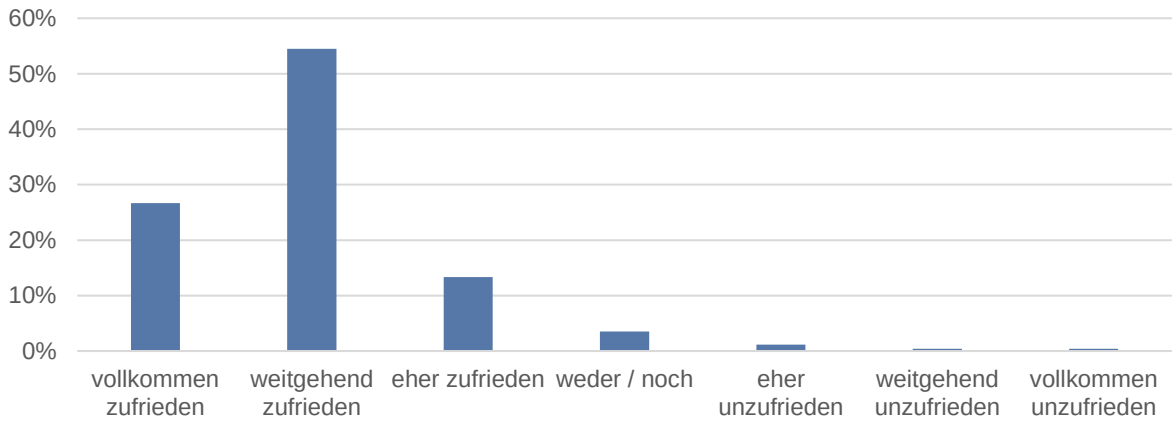


Abbildung 9: Globales Zufriedenheitsurteil: Wie zufrieden sind Sie insgesamt mit Ihren Elektroautos? Befragungszeitpunkt: t_1; $n_F(t_1) = 242$

Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse als Statistik zum Gleichheitstest der Gruppenmittelwerte der Fuhrparkleitergruppen mit unterschiedlicher globaler Zufriedenheit.

Tabelle 10: Gleichheitstest der Gruppenmittelwerte nach Zufriedenheit der Erhebungseinheiten (Diskriminanzanalyse)

Gleichheitstest der Gruppenmittelwerte			
Merkmalsvariable	**Merkmalsausprägung**	**F**	**Signifikanz**
Nutzer-Poolfahrzeug-Verhältnis	>=5 Nutzer	,949	,461
	>=10 Nutzer	1,219	,298
	>=15 Nutzer	1,628	,141
Dienstwagenanteil	Dienstwagenquote größer als 20%	,522	,791
	Dienstwagenquote größer als 40%	1,606	,147
	Dienstwagenquote größer als 60%	1,971	,071
	Dienstwagenquote größer als 80%	2,470	,025[1]
Vorerfahrung Elektroauto	Vorerfahrung Elektroauto	2,046	,061[2]
Beschaffungstyp	Grüner Innovator?	,749	,611
Stromerzeugung	Strom selbst erzeugen?	,838	,542
Flotten-Emissionsmonitoring	Erhebung von CO^2 Emissionen	,726	,629
Fahrtstrecken Flottenfahrzeuge: Anteil bis 100 km einfache Strecke	Anteil >=25%	,302	,935
	Anteil >=50%	,850	,533
	Anteil >=75%	,633	,704
Fahrtstrecken Flottenfahrzeuge: Anteil mehr als 100 km bis 200 km einfache Strecke	Anteil >=25%	,638	,699
	Anteil >=50%	1,426	,206
	Anteil >=75%	.[a]	.[a]
Firmenstandort	Städtischer Raum?	1,134	,344

1 Signifikant bei Signifikanzniveau von 95%; a Kann nicht berechnet werden, da Konstante.

2 Signifikant bei Signifikanzniveau von 90%.

Es wird deutlich, dass eine Dienstwagenquote in Firmenflotten von mehr als 80% sich signifikant auf das Zufriedenheitsurteil der Fuhrparkleiter auswirkte. Bei einer Anpassung des Signifikanzniveaus von 95% auf 90% gilt dies auch für die Vorerfahrung mit Elektroautos. Bei allen anderen Merkmalen des von Ex-

perten zusammengestellten Variablensatzes ließ sich dagegen kein signifikanter Einfluss auf die Zuordnung der Fuhrparkleiter zu verschiedenen Zufriedenheitskategorien feststellen – sie können demnach nicht als Einflussfaktoren der globalen Fahrzeugzufriedenheit gelten.

Auswahl von Erhebungseinheiten bzw. die Stichprobenziehung

Im Hinblick auf die zuvor definierten Forschungsziele und Forschungsfragen wurden dem Verbundpartner Alphabet Fuhrparkmanagement GmbH vor dem offiziellen Vertriebsstart Richtlinien zur Kunden-Incentivierung übergeben. Damit sollte sichergestellt werden, dass die Zusammenstellung der Erhebungsgesamtheit möglichst gut im Einklang mit den zuvor definierten Forschungszielen der Universität Duisburg-Essen erfolgte. Die Incentivierungsmaßnahmen sollten entsprechend ausgestaltet und gesteuert werden.

Da zu diesem Zeitpunkt die tatsächliche Marktnachfrage nach den geförderten Projektfahrzeugen nicht verlässlich abzuschätzen war, wurde zwischen den beteiligten Verbundpartnern vereinbart, dass ein kontinuierlicher Abgleich zwischen realisierter und gewünschter Erhebungsgesamtheit während der Kunden-Incentivierung erfolgen sollte. Bei starken Abweichungen wären sowohl Anpassungen der Incentivierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung des allgemeinen Marktumfelds und der Nachfrage in Frage gekommen. Der Abgleich wurde durch die Universität Duisburg-Essen im Rahmen der quartalweisen Übergabe neuer Teilnehmerkontakte bis zur Erschöpfung der Fördermittel für Projektfahrzeuge laufend vorgenommen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Leitlinien zur Erhebungsgesamtheit noch einmal kurz zusammengefasst:

Relevanter Flottenmarkt

Die Erhebungsgesamtheit sollte aus dem „relevanten Flottenmarkt“ rekrutieren. Dieser umfasst sämtliche gewerblichen Zulassungen, abzüglich derer von Autovermietern, Automobilherstellern und –händlern.

Branchenverteilung

Es sollte ein heterogener Branchen-Mix in der Erhebungsgesamtheit erreicht werden.

Antriebsarten

Verteilung der Antriebsarten und Fahrzeugklasse sollte nach den Annahmen und Erwartungen der Nationalen Entwicklungsplattform Elektromobilität (NPE) erfolgen.[13]

- Anteil reinelektrisches Elektrofahrzeuge (BEV): 55%,
- Anteil von Plug in-Hybriden (PHEV) und Range Extender-Modellen (REX): 45%.

[13] Zweiter Bericht der Nationale Plattform Elektromobilität (2011), S. 31f.

Fuhrparkgrößenklassen

Die Erhebungsgesamtheit sollte als geschichtete Stichprobe zusammengestellt werden.

- Größere Flotten (mehr als 50 Firmen-Pkw) sollten zur Abgrenzung von den Privatnutzerbefragungen und wegen organisatorischer Überlegungen überrepräsentiert sein.
- Kleinere Flotten sollten zwar unterrepräsentiert, aber nicht von der Projektteilnahme ausgeschlossen werden.
- Auch die Vergabe von Projektfahrzeugen an Kleinst- und Kleinflotten (mit weniger als 10 Firmen-Pkw) war erlaubt. „Small"-Flotten sollten aber maximal 5 bis 10% der Projektfahrzeuge halten.

Gruppen von Befragungseinheiten

Etwa 25% der Projektfahrzeuge sollten an Dienstwagennutzer mit anteiliger Privatnutzung und Mitspracherecht bei der Modellauswahl und Fahrzeugkonfiguration vergeben werden.

Fahrzeugsegmente und Modelle

Das dem Verbundpartner Alphabet Fuhrparkmanagement GmbH zur Verfügung stehende Modellportfolio sollte ausgenutzt werden. Eine Konzentration auf einzelne Fahrzeugsegmente, Marken und Modelle sollte vermieden werden.

3.1.8 AP 4200 Ermittlung flottenspezifischer Fahrzeuganforderungen und Nutzerpräferenzen durch Vorbefragungen sowie deren Abgleich mit den elektrifizierten Antriebskonzepten für eine effiziente Verteilung der Fahrzeuge in der Feldphase

Ziele des Arbeitspakets 4200

Die Ziele des Arbeitspakets waren die Konzeption und die Umsetzung der Erstbefragungsrunden von Fuhrparkleitern, Dienstwagenfahrern und Poolnutzern.

Konzeption

Die Erstbefragungsrunde beinhaltete für die zuvor definierten drei Gruppen von Erhebungseinheiten jeweils ein Telefoninterview durch Projektmitarbeiter der Universität Duisburg-Essen und einen Online-Fragebogen. Die Onlinefragebögen waren im Anschluss an das Telefoninterview selbständig durch die Befragungseinheiten auszufüllen. Die Erstbefragungsrunde sollte bei allen Erhebungseinheiten zeitnah nach Erhalt der Projektfahrzeuge erfolgen (in der Regel innerhalb der ersten 4 bis 6 Wochen).

Abbildung 10 zeigt noch einmal das Studiendesign. Die in diesem Arbeitspaket zu bearbeitende Erstbefragungsrunde wird dabei durch den roten Rahmen eingefasst:

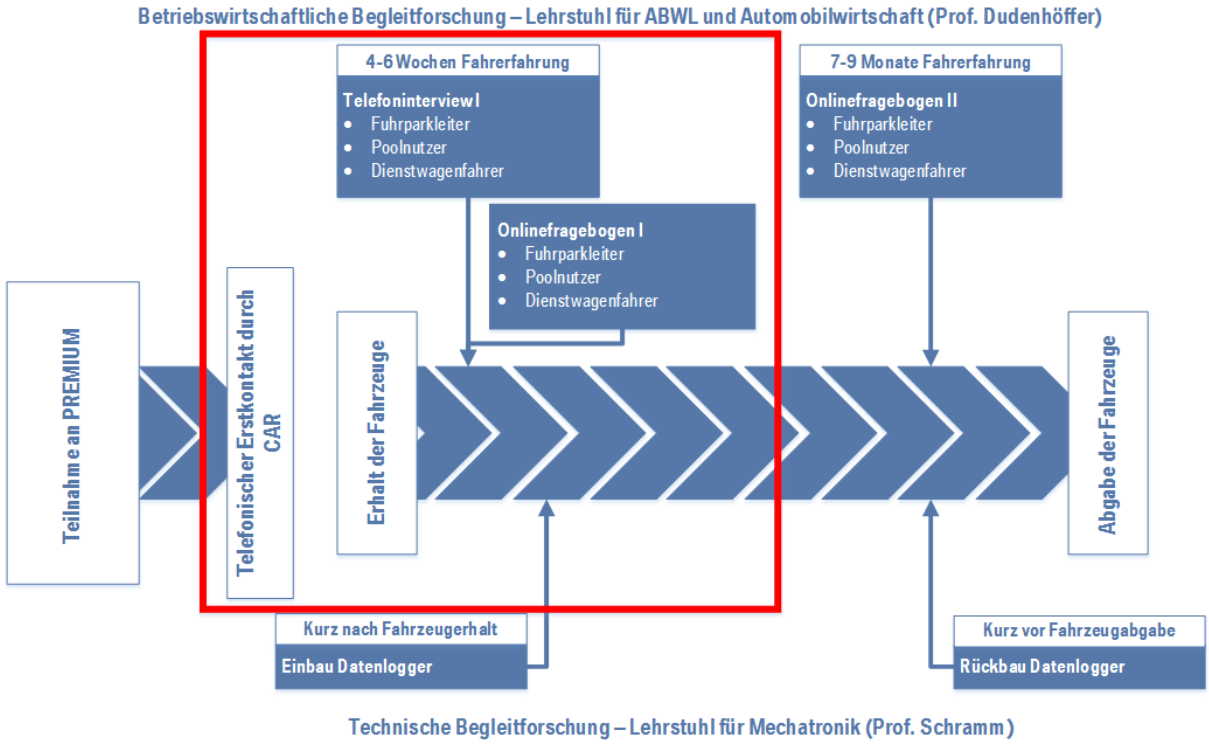


Abbildung 10: Studiendesign mit Fokus auf Arbeitspaket 4200

Programmierung der Fragebögen, Pre-Test, Überarbeitung

Die aus dem zuvor erstellten Forschungsplan abgeleiteten Fragebogendesigns für die Erstbefragungsrunde wurden zunächst in die verwendete Befragungssoftware Questback Unipark® programmiert. Der Programmierung folgte eine dreiwöchige Pre-Testphase, während der die Fragebögen im Testmodus der Befragungssoftware kritisch hinsichtlich der Bearbeitungsdauer, der Verständlichkeit und Fehlerfreiheit der Forschungsfragen sowie der Fragebogenstruktur[14] geprüft wurden. Die 8 Pre-Testteilnehmer aus Forschung und Praxis konnten Kritik und Verbesserungsvorschläge zur präsentierten Umsetzung jeder Forschungsfrage elektronisch anmerken. Die Anmerkungen wurden anschließend geprüft und die Fragebögen entsprechend überarbeitet. Insgesamt wurden so drei Bearbeitungsschleifen notwendig. Im Anschluss daran konnten die Fragebögen für alle Gruppen von Auskunftspersonen aktiv geschaltet werden.

Tabelle 11 zeigt die Themenbereiche und eine Auswahl der Forschungsfragen der Erstbefragungsrunde (t_0) für die drei Gruppen von Auskunftspersonen:

[14] Hierunter fällt beispielsweise die Prüfung der Funktionalität von programmierten Filterfragen, die für die Verzweigungen der Fragebögen von großer Wichtigkeit sind.

Tabelle 11: Themenbereiche der Erstbefragungsrunde nach Gruppen von Auskunftspersonen

Themenbereiche der Erstbefragungsrunde nach Gruppen von Auskunftspersonen			
	Fuhrparkleiter	**Dienstwagennutzer**	**Poolfahrzeugnutzer**
Telefoninterview I	**Ziele und Motive** *Anschaffung* *Emissionsziele* *…* **Beschaffung** *Kaufkriterien* *Beschaffungsprozess* *…* **Nutzungsprofil Verbrenner** *Streckenlängen* *Fahrtzwecke* *…*	**Ziele und Motive** *Anschaffung* *…* **Beschaffung** *Kaufkriterien* *„Freedom of Choice“* *…* **Nutzungsprofil Verbrenner** *Streckenlängen* *Nutzungshäufigkeit* *…*	**Ziele und Motive** *Nutzungsmotive* *…* **Nutzungsprofil Verbrenner** *Streckenlängen* *Nutzungshäufigkeit* *…*
Onlinefragebogen I	**Projektfahrzeuge** *Marke/Modell* *Anzahl* *…* **Persönliche Daten** *Soziodemografika* *Wissen* *…* **Flottendaten** *Betriebsdaten* *Flottengröße* *Nutzerzahlen* *…*	**Projektfahrzeuge** *Marke/Modell* *…* **Persönliche Daten** *Soziodemografika* *Wissen/Innovativität* *…* **Betriebsdaten** *Branche* *…*	**Projektfahrzeuge** *Marke/Modell* *…* **Persönliche Daten** *Soziodemografika* *Position im Betrieb* *Wissen* *…*

Vorgehensweise bei der Erstkontaktaufnahme

Besonderes Augenmerk musste auf die richtige Zuordnung der Auskunftspersonen auf die unterschiedlichen Gruppen in den kontaktierten Befragungseinheiten gelegt werden. Für die Kontaktaufnahme wurde deshalb ein Verfahren entwickelt, das die richtige Zuordnung anhand einer Reihe unterschiedlicher Prüfkriterien ermöglichte. In der Regel konnte die Zuordnung schon bei der Erstkontaktaufnahme mit den Befragungseinheiten erfolgen. Poolfahrzeugnutzer wurden in der Regel indirekt über den zuvor identifizierten Fuhrparkleiter angesprochen und zur Teilnahme an den Befragungen aufgefordert. Bei 63% der Dienstwagennutzer erfolgte die Erstkontaktaufnahme allerdings ebenfalls direkt durch Projektmitarbeiter der Universität Duisburg-Essen, da hier kein Fuhrparkleiter vorhanden war.

Mit dem Verbundpartner Alphabet Fuhrparkmanagement GmbH wurde eine quartalsweise Übergabe von neuen Projektteilnehmern nach erfolgreicher Akquisition vereinbart. Insgesamt wurden 8 Teilnehmerkontaktlisten im Laufe von 24 Monaten übergeben. Weiterhin wurde vereinbart, dass bei fehlgeschlagener Erstkontaktaufnahme durch die Universität Duisburg-Essen, eine Überprüfung und gegebenenfalls eine Korrektur der Kontaktdaten durch die Alphabet Fuhrparkmanagement GmbH erfolgen musste.

Abbildung 11 schildert die übliche Vorgehensweise bei der Erstkontaktaufnahme mit den Erhebungseinheiten und die herangezogenen Prüfkriterien zur Zuordnung der Kontaktperson zu den Gruppen von Auskunftspersonen.

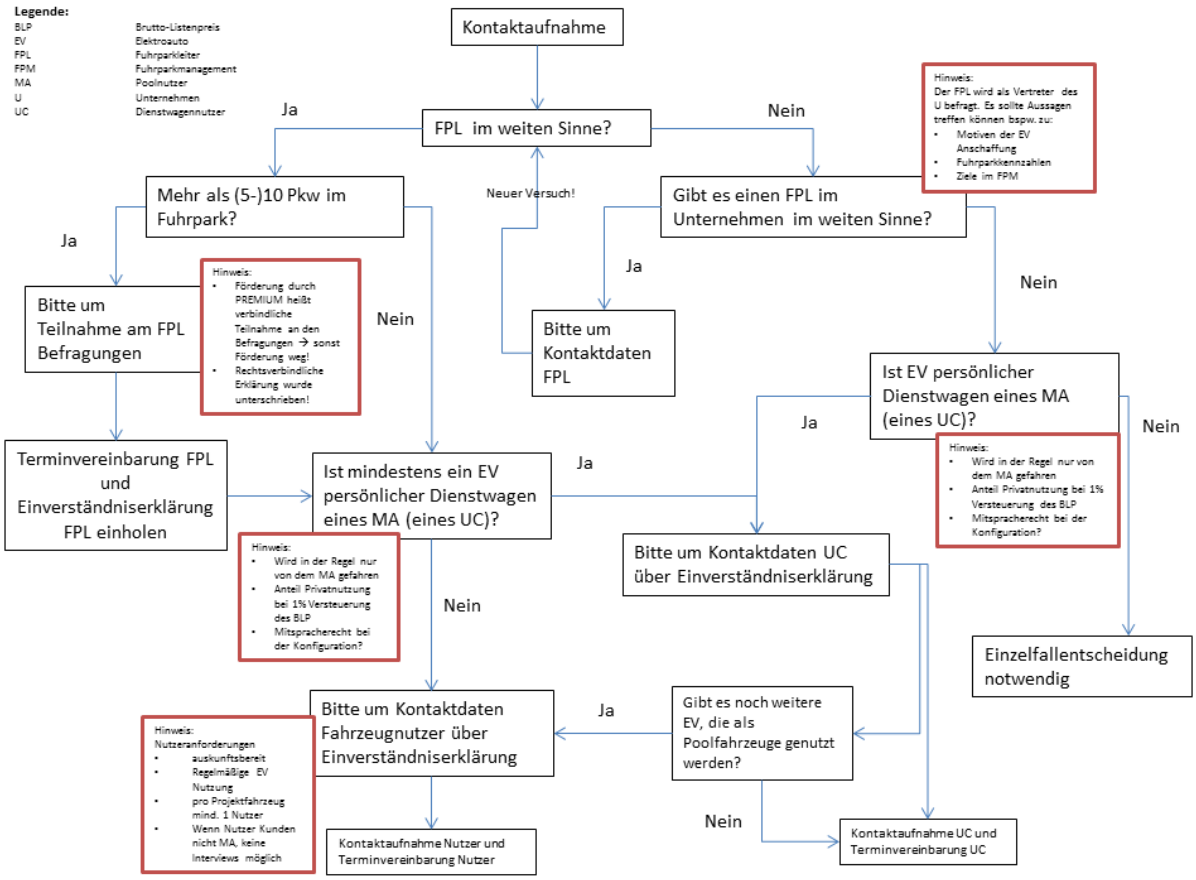
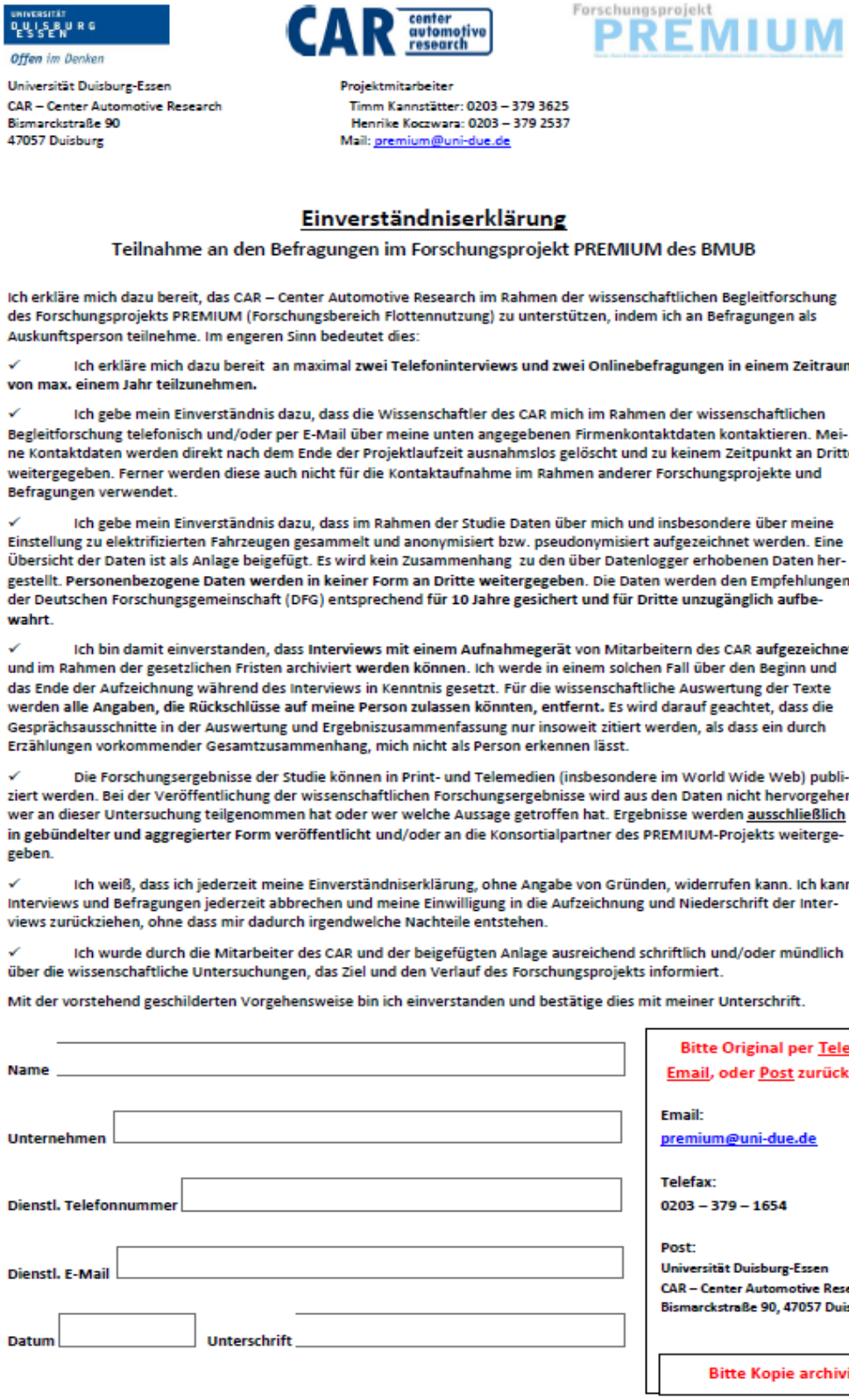


Abbildung 11: Vorgehensweise bei der Erstkontaktaufnahme mit den Erhebungseinheiten

Die Erstkontaktaufnahme beinhaltete weiterhin die Einholung der Einverständniserklärungen zur Teilnahme bei den drei Gruppen von Auskunftspersonen und die Terminvereinbarungen für die Telefoninterviews. Hierfür wurde ein Dokument mit datenschutzrechtlichen Hinweisen und Formularfeldern zur Angabe individueller Kontaktdaten – wie etwa der Mailadresse und der dienstlichen Telefonnummer – erstellt. Im Sinne des Prinzips „Ohne Einverständniserklärung keine Befragung“ musste das Dokument von allen späteren Auskunftspersonen ausgefüllt und an die Universität Duisburg-Essen zurückgesendet werden. Erst danach durften die Befragungen der Auskunftspersonen stattfinden.

Abbildung 12 zeigt das verwendete Dokument „Einverständniserklärung zur Teilnahme“ noch einmal im Wortlaut.



Universität Duisburg-Essen
CAR – Center Automotive Research
Bismarckstraße 90
47057 Duisburg

Projektmitarbeiter
Timm Kannstätter: 0203 – 379 3625
Henrike Koczwara: 0203 – 379 2537
Mail: premium@uni-due.de

Einverständniserklärung

Teilnahme an den Befragungen im Forschungsprojekt PREMIUM des BMUB

Ich erkläre mich dazu bereit, das CAR – Center Automotive Research im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung des Forschungsprojekts PREMIUM (Forschungsbereich Flottennutzung) zu unterstützen, indem ich an Befragungen als Auskunftsperson teilnehme. Im engeren Sinn bedeutet dies:

✓ Ich erkläre mich dazu bereit an maximal **zwei Telefoninterviews und zwei Onlinebefragungen in einem Zeitraum von max. einem Jahr teilzunehmen.**

✓ Ich gebe mein Einverständnis dazu, dass die Wissenschaftler des CAR mich im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung telefonisch und/oder per E-Mail über meine unten angegebenen Firmenkontaktdaten kontaktieren. Meine Kontaktdaten werden direkt nach dem Ende der Projektlaufzeit ausnahmslos gelöscht und zu keinem Zeitpunkt an Dritte weitergegeben. Ferner werden diese auch nicht für die Kontaktaufnahme im Rahmen anderer Forschungsprojekte und Befragungen verwendet.

✓ Ich gebe mein Einverständnis dazu, dass im Rahmen der Studie Daten über mich und insbesondere über meine Einstellung zu elektrifizierten Fahrzeugen gesammelt und anonymisiert bzw. pseudonymisiert aufgezeichnet werden. Eine Übersicht der Daten ist als Anlage beigefügt. Es wird kein Zusammenhang zu den über Datenlogger erhobenen Daten hergestellt. **Personenbezogene Daten werden in keiner Form an Dritte weitergegeben.** Die Daten werden den Empfehlungen der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) entsprechend **für 10 Jahre gesichert und für Dritte unzugänglich aufbewahrt.**

✓ Ich bin damit einverstanden, dass **Interviews mit einem Aufnahmegerät** von Mitarbeitern des CAR **aufgezeichnet** und im Rahmen der gesetzlichen Fristen archiviert **werden können.** Ich werde in einem solchen Fall über den Beginn und das Ende der Aufzeichnung während des Interviews in Kenntnis gesetzt. Für die wissenschaftliche Auswertung der Texte werden **alle Angaben, die Rückschlüsse auf meine Person zulassen könnten, entfernt.** Es wird darauf geachtet, dass die Gesprächsausschnitte in der Auswertung und Ergebniszusammenfassung nur insoweit zitiert werden, als dass ein durch Erzählungen vorkommender Gesamtzusammenhang, mich nicht als Person erkennen lässt.

✓ Die Forschungsergebnisse der Studie können in Print- und Telemedien (insbesondere im World Wide Web) publiziert werden. Bei der Veröffentlichung der wissenschaftlichen Forschungsergebnisse wird aus den Daten nicht hervorgehen, wer an dieser Untersuchung teilgenommen hat oder wer welche Aussage getroffen hat. Ergebnisse werden **ausschließlich in gebündelter und aggregierter Form veröffentlicht** und/oder an die Konsortialpartner des PREMIUM-Projekts weitergegeben.

✓ Ich weiß, dass ich jederzeit meine Einverständniserklärung, ohne Angabe von Gründen, widerrufen kann. Ich kann Interviews und Befragungen jederzeit abbrechen und meine Einwilligung in die Aufzeichnung und Niederschrift der Interviews zurückziehen, ohne dass mir dadurch irgendwelche Nachteile entstehen.

✓ Ich wurde durch die Mitarbeiter des CAR und der beigefügten Anlage ausreichend schriftlich und/oder mündlich über die wissenschaftliche Untersuchungen, das Ziel und den Verlauf des Forschungsprojekts informiert.

Mit der vorstehend geschilderten Vorgehensweise bin ich einverstanden und bestätige dies mit meiner Unterschrift.

Name _____

Unternehmen _____

Dienstl. Telefonnummer _____

Dienstl. E-Mail _____

Datum _____ Unterschrift _____

Bitte Original per Telefax, oder Email, oder Post zurücksenden an:

Email:
premium@uni-due.de

Telefax:
0203 – 379 – 1654

Post:
Universität Duisburg-Essen
CAR – Center Automotive Research
Bismarckstraße 90, 47057 Duisburg

Bitte Kopie archivieren!

Abbildung 12: Einverständniserklärung zur Teilnahme an den Befragungen im Wortlaut

Interviewerakquise, –schulung und -betreuung

Zur Umsetzung der Erstbefragungsrunde war der Einsatz von Telefoninterviewern notwendig. Insgesamt wurden während der 14-monatigen Feldphase 8 studentische Hilfskräfte als Interviewer aus den Projektmitteln finanziert. Die Interviewer schlossen in diesem Zeitraum 714 Telefoninterviews erfolgreich ab. Neben der Umsetzung der Telefoninterviews wurden die Telefoninterviewer im Verlauf der Datenerhebungsphase auch für Erstkontaktaufnahmen mit den Befragungseinheiten eingesetzt.

Die studentischen Hilfskräfte wurden vor ihrem Einsatz in der Feldphase hinsichtlich der internen Prozesse zur Kontrolle und Dokumentation des Befragungsfortschritts, den Fragebogendesigns und einschlägigen Interviewtechniken von den Projektmitarbeitern der Universität Duisburg-Essen geschult. Außerdem wurde der Umgang mit der verwendeten Befragungssoftware Questback Unipark® in mehreren Workshops vermittelt. Schließlich wurde ein bestehendes Befragungslabor der Universität Duisburg-Essen für das Vorhaben angepasst: Es wurden individuelle Arbeitspläne erstellt, die Arbeitsplätze zugeteilt und – falls notwendig – neue Arbeitsmittel angeschafft.

Auskunftspersonen, bei denen die „Einverständniserklärung zur Teilnahme“ vorlagen, wurden wöchentlich unter den Interviewern verteilt. Eigenverantwortlich waren durch die Interviewer anschließend die Telefoninterview-Termine zu vereinbaren und das Telefoninterview zu realisieren. Außerdem fielen die Kontrolle des weiteren Befragungsfortschritts (Onlinefragebögen) und – falls notwendig – das Versenden von Erinnerungsmails an die zugeteilten Auskunftspersonen und telefonisches Nachfassen in das Aufgabenspektrum der Interviewer. Alle Maßnahmen mussten in einer zentralen Teilnehmerdatenbank dokumentiert und aktualisiert werden, wodurch ein jederzeit kontrollierbarer Gesamtüberblick über den Befragungsfortschritt auf Tagesbasis möglich war.

Steuerung und Kontrolle der Feldphasen

Die Steuerung der Feldphasen erforderte wegen der Aufteilung der Datenerhebung auf die 2 unterschiedlichen Erhebungsformen bei drei Gruppen von Auskunftspersonen große Aufmerksamkeit.

Report der Feldphase der Fuhrparkleiter-Erstbefragungen

Der Befragungsfortschritt wurde kontinuierlich erfasst. Abbildung 13 zeigt die kumulierte Anzahl aller Telefoninterview-Teilnehmer im Verlauf der 15-monatigen Feldphase.

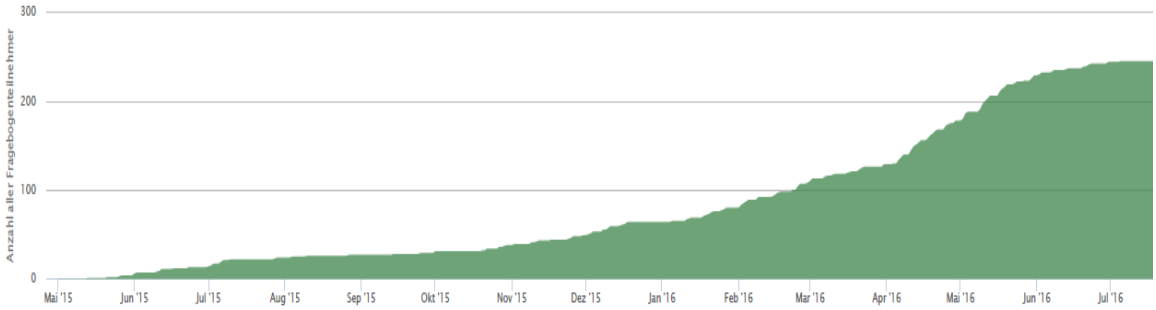


Abbildung 13: Anzahl aller abgeschlossenen Telefoninterviews während der Feldzeit (Erstbefragung Fuhrparkleiter)

Das durchschnittliche Telefoninterview mit den Fuhrparkleitern dauerte im Mittel etwa 47 Minuten. Pro Tag wurde ab Mai 2015 bis August 2016 rechnerisch 1,8 Telefoninterviews mit Fuhrparkleitern geführt – pro Woche waren es durchschnittlich 4,7 Telefoninterviews. Insgesamt wurden 245 Telefoninterviews mit Fuhrparkleitern abgeschlossen.

Den zweiten Bestandteil der Erstbefragungen von Fuhrparkleitern bildete der erste Onlinefragebogen. Um eine möglichst hohe Ausschöpfungsquote erreichen zu können, wurden die Auskunftspersonen am Ender der Telefoninterviews noch einmal darauf hingewiesen, den Onlinefragebogen zeitnah – am besten direkt im Anschluss an das Telefoninterview – auszufüllen. Nur in Ausnahmefällen geschah dies nicht.

Abbildung 14 illustriert die kumulierte Anzahl aller Onlinefragebogen-Teilnehmer im Verlauf der 16-monatigen Feldphase.

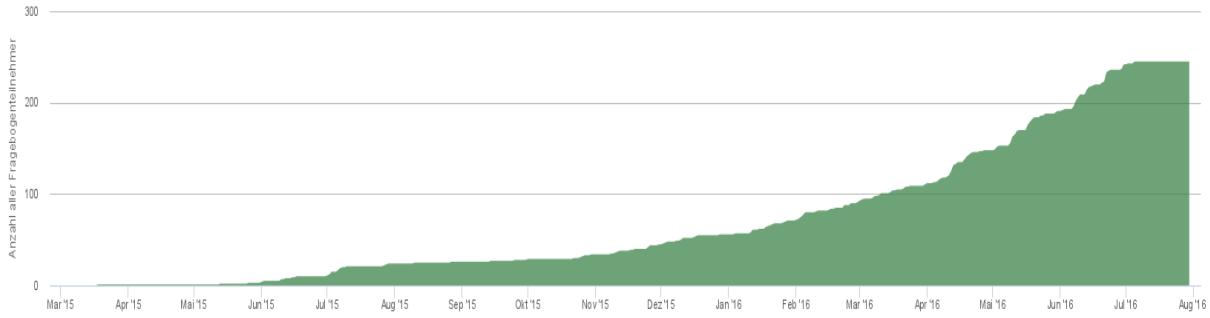


Abbildung 14: Anzahl aller abgeschlossenen Onlinefragebögen während der Feldzeit (Erstbefragung Fuhrparkleiter)

Die Beantwortung des Onlinefragebogens dauerte durchschnittlich 38 Minuten – der Median der Bearbeitungsdauer lag bei 26 Minuten und damit deutlich niedriger. Pro Tag wurde ab März 2015 bis Ende August 2016 rechnerisch 1,7 Onlinefragebögen von Fuhrparkleitern vollständig beantwortet – pro Woche waren es durchschnittlich 4,8 Onlinefragebögen. Insgesamt wurden 245 Onlinefragebögen von Fuhrparkleitern vollständig ausgefüllt.

Tabelle 12 bereitet die wichtigsten Kennzahlen der Telefon- und Onlinebefragungen von Fuhrparkleitern noch einmal auf.

Tabelle 12: Statistik zu den Telefoninterviews und Onlinefragebögen (Erstbefragung Fuhrparkleiter)

Statistische Kennzahlen		
Befragung	Telefoninterview (CATI)	Onlinefragebogen (CAWI)
Die angezeigten Daten beziehen sich auf die Feldzeit vom…	*…01.05.2015 bis 29.07.2016 (455 Tage)*	*…01.03.2015 bis 29.07.2016 (516 Tage)*
Gesamtsample (Brutto)	245	245
Mittlere Bearbeitungszeit (arithm. Mittel)	0h 47m 25s	0h 38m 7s
Mittlere Bearbeitungszeit (Median)	0h 43m 29s	0h 26m 28s
Durchschnittliche Teilnehmeranzahl pro Tag	1.84	1.74
Durchschnittliche Teilnehmeranzahl pro Woche	4.71	4.80

Report der Feldphase der Dienstwagennutzer-Erstbefragungen

Auch der Befragungsfortschritt der Dienstwagennutzer-Erstbefragungen wurde kontinuierlich erfasst. Abbildung 15 zeigt für die teilnehmenden Dienstwagenfahrer die kumulierte Anzahl aller beendeten Telefoninterviews im Verlauf der 15-monatigen Feldphase.

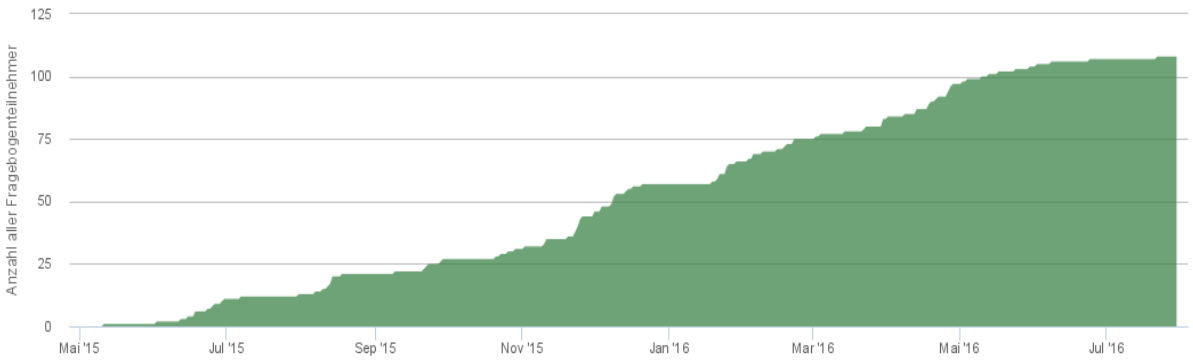


Abbildung 15: Anzahl aller abgeschlossenen Telefoninterviews während der Feldzeit (Erstbefragung Dienstwagenfahrer)

Das durchschnittliche Telefoninterview mit den Dienstwagennutzern dauerte im Mittel etwa 42 Minuten. Pro Tag wurde ab Mai 2015 bis Ende Juli 2016 rechnerisch 1,3 Telefoninterviews mit Dienstwagenfahrern geführt – pro Woche waren es durchschnittlich 2,4 Telefoninterviews. Insgesamt wurden 108 Telefoninterviews mit Dienstwagennutzern abgeschlossen.

Auch bei den Dienstwagennutzern wurden die Erstbefragungen durch einen Onlinefragebogen abgeschlossen, der von den Teilnehmern selbständig im Anschluss an das Telefoninterview auszufüllen war. Abbildung 16 zeigt die kumulierte Anzahl aller Onlinefragebogen-Teilnehmer im Verlauf der 16-monatigen Feldphase.

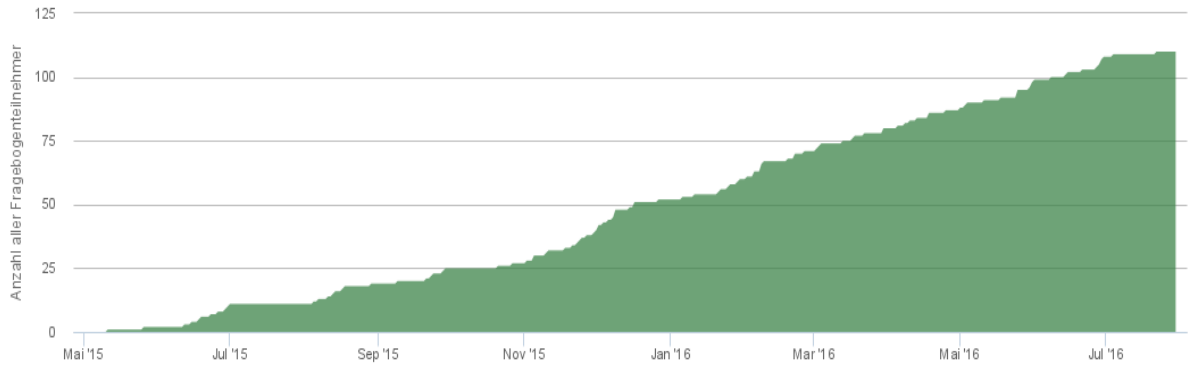


Abbildung 16: Anzahl aller abgeschlossenen Onlinefragebögen während der Feldzeit (Erstbefragung Dienstwagenfahrer)

Die Beantwortung des Onlinefragebogens dauerte durchschnittlich 25 Minuten – der Median der Bearbeitungsdauer lag bei 22 Minuten. Pro Tag wurde ab Mai 2015 bis Ende Juli 2016 rechnerisch 1,2 Onlinefragebögen von Dienstwagennutzern vollständig beantwortet – pro Woche waren es durchschnittlich 2,2 Onlinefragebögen. Insgesamt wurden 110 Onlinefragebögen von Dienstwagennutzern vollständig ausgefüllt.

Tabelle 13 bereitet die wichtigsten Kennzahlen der Telefon- und Onlinebefragungen von Dienstwagennutzern noch einmal auf.

Tabelle 13: Statistik zu den Telefoninterviews und Onlinefragebögen (Erstbefragung Dienstwagennutzer)

Statistische Kennzahlen		
Befragung	Telefoninterview (CATI)	Onlinefragebogen (CAWI)
Die angezeigten Daten beziehen sich auf die Feldzeit vom 01.05.2015 bis 29.07.2016 (455 Tage)		
Gesamtsample (Brutto)	108	110
Mittlere Bearbeitungszeit (arithm. Mittel)	0h 42m 10.22s	0h 25m 34.26s
Mittlere Bearbeitungszeit (Median)	0h 41m 31s	0h 22m 51.5s
Durchschnittliche Teilnehmeranzahl pro Tag	1.27	1.16
Durchschnittliche Teilnehmeranzahl pro Woche	2.35	2.16

Report der Feldphase der Poolnutzer-Erstbefragungen

Schließlich musste auch der Befragungsfortschritt der Poolnutzer-Erstbefragungen kontinuierlich erfasst werden. Mit jeweils mehr als 300 Auskunftspersonen stellten diese Gruppe die größten Stichproben. Abbildung 17 zeigt für die teilnehmenden Poolnutzer die kumulierte Anzahl aller beendeten Telefoninterviews im Verlauf der 15-monatigen Feldphase.

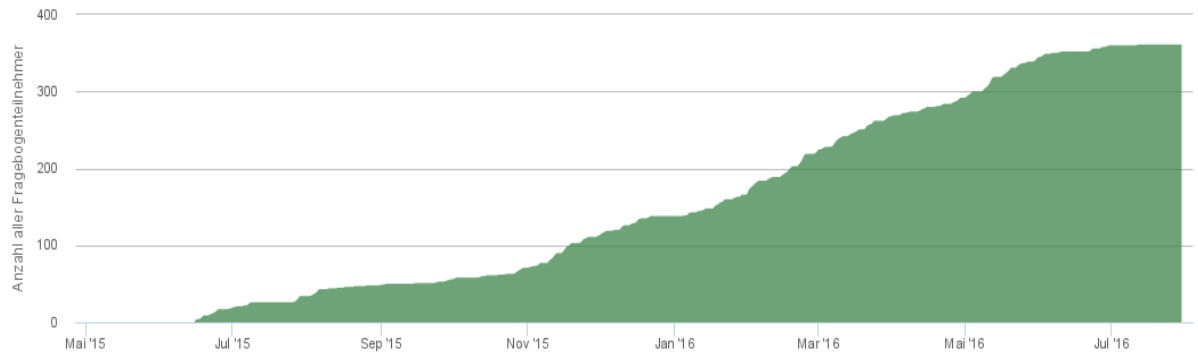


Abbildung 17: Anzahl aller abgeschlossenen Telefoninterviews während der Feldzeit (Erstbefragung Poolnutzer)

Das durchschnittliche Telefoninterview mit den Poolnutzern dauerte im Mittel etwa 35 Minuten. Pro Tag wurde ab Mai 2015 bis Ende Juli 2016 rechnerisch 2,1 Telefoninterviews mit Poolnutzern geführt – pro

Woche waren es durchschnittlich 7,2 Telefoninterviews. Insgesamt wurden 361 Telefoninterviews mit Poolnutzern abgeschlossen.

Wiederum bildete auch bei den Poolnutzern ein selbständig auszufüllender Onlinefragebogen die zweite Kommunikationsform der Erstbefragung. Abbildung 18 zeigt die kumulierte Anzahl aller Onlinefragebogen-Teilnehmer im Verlauf der 16-monatigen Feldphase.

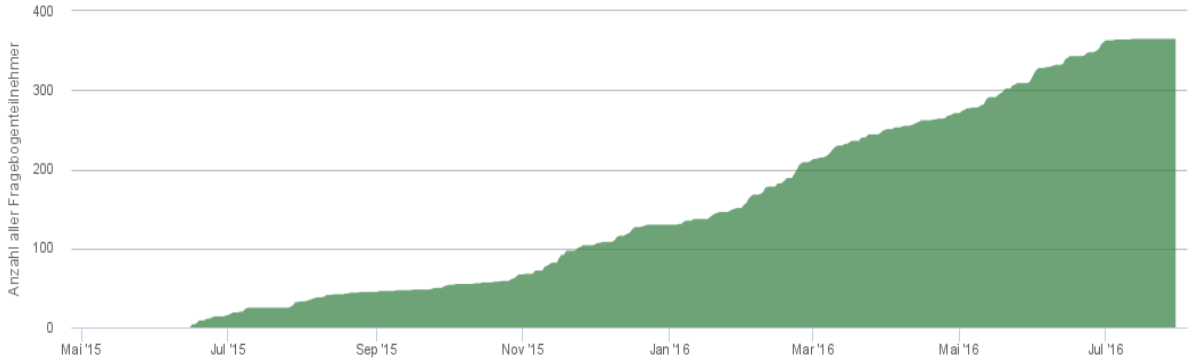


Abbildung 18: Anzahl aller abgeschlossenen Onlinefragebögen während der Feldzeit (Erstbefragung Poolnutzer)

Die Beantwortung des Onlinefragebogens dauerte bei den Poolnutzern durchschnittlich 26 Minuten – der Median der Bearbeitungsdauer lag bei 21 Minuten. Pro Tag wurde ab Mai 2015 bis Ende Juli 2016 rechnerisch 2,1 Onlinefragebögen von Dienstwagennutzern vollständig beantwortet – pro Woche waren es durchschnittlich 6,9 Onlinefragebögen. Insgesamt wurden 365 Onlinefragebögen von Dienstwagennutzern vollständig ausgefüllt.

Tabelle 14 bereitet die wichtigsten Kennzahlen der Telefon- und Onlinebefragungen von Poolnutzern noch einmal auf:

Tabelle 14: Statistik zu den Telefoninterviews und Onlinefragebögen (Erstbefragung Poolnutzer)

Statistische Kennzahlen		
Befragung	Telefoninterview (CATI)	Onlinefragebogen (CAWI)
Die angezeigten Daten beziehen sich auf die Feldzeit vom 01.05.2015 bis 29.07.2016 (455 Tage)		
Gesamtsample (Brutto)	361	365
Mittlere Bearbeitungszeit (arithm. Mittel)	0h 35m 0.35s	0h 26m 10.2s
Mittlere Bearbeitungszeit (Median)	0h 29m 24.5s	0h 21m 24s
Durchschnittliche Teilnehmeranzahl pro Tag	2.09	2.07
Durchschnittliche Teilnehmeranzahl pro Woche	7.22	6.89

Datenaufbereitung und –bereinigung

Vor Beginn der Datenerhebung wurde jeder Auskunftsperson eine spezifische Identifikationskennung zugeteilt. Die sorgte einerseits für die datenschutzrechtliche Pseudonymisierung und andererseits für die Identifikation der Auskunftspersonen anhand einer einfachen, unpersönlichen Kennziffer. Da bei der Erstbefragung sowohl ein Telefoninterview, als auch ein Online-Fragebogen zur Datenerhebung genutzt wurde, mussten die Datensätze dahingehend bereinigt werden, dass in den letztendlich ausgewerteten Stichproben nur noch Teilnehmer vorhanden sind, die auch an beiden Befragungsformen teilgenommen haben. Die Einzelstichproben wurden dann über die Identifikationskennung verglichen und Teilnehmer, die nur an einer Befragungsform teilgenommen haben wurden aus der Stichprobe entfernt. Für die jeweiligen drei Unterstichproben haben sich somit die in Tabelle 15 angegebenen Stichprobengrößen ergeben.

Tabelle 15: Stichprobengrößen nach Bereinigung t_0

	CAWI 1	CATI 1	T0 Stichprobengröße
Poolnutzer	365	361	360
Dienstwagennutzer	110	108	108
Fuhrparkleiter	245	245	245

Zusätzlich ist es häufig vorgekommen, dass nicht jede Frage von jedem Teilnehmer vollständig beantwortet wurde. Somit variieren die Stichprobengrößen der einzelnen Fragen zusätzlich.

3.1.9 AP 4300 Kundenincentivierung

Ziele des Arbeitspakets 4300

Das Ziel der Universität Duisburg-Essen im Rahmen war die Unterstützung des Verbundpartners Alphabet Fuhrparkmanagement GmbH bei der Kunden-Incentivierung.

Informationsbroschüre und Beratungsservice

Im Rahmen der Kunden-Incentivierung wurde für teilnahmeinteressiere Flottenbetreiber eine 12-seitige Informationsbroschüre zum geplanten Vorhaben durch die Universität Duisburg-Essen erstellt. Die Broschüre wurde während der Vertriebsmaßnahmen durch den Verbundpartner Alphabet Fuhrparkmanagement GmbH eingesetzt. Das Dokument umfasste alle wesentlichen Informationen zu den verfolgten Zielsetzungen, zur objektiven und subjektiven Begleitforschung der Universität Duisburg-Essen und den Pflichten der Teilnehmer. Zusätzlich wurden wesentliche Informationen zum Datenschutz bereitgestellt.

Außerdem wurden in der Broschüre Kontaktdaten bereitgestellt, unter denen teilnahmeinteressierte Flottenbetreiber bei Bedarf weitere Informationen zur wissenschaftlichen Begleitforschung von Mitarbeitern der Universität Duisburg-Essen erhalten konnten. Von dem bereitgestellten Beratungsservice wurde während der Kunden-Incentivierung vielfach Gebrauch gemacht.

3.1.10 AP 4400 Durchführung begleitender Befragungen der Fuhrparknutzer und Flottenmanager

Ziele des Arbeitspakets 4400

Die Ziele des Arbeitspakets waren die Konzeption und die Umsetzung der Zweitbefragungsrunden von Fuhrparkleitern, Dienstwagenfahrern und Poolnutzern.

Konzeption

Die Zweitbefragungsrunde beinhaltete für die zuvor definierten drei Gruppen von Erhebungseinheiten jeweils einen Onlinefragebogen. Die Onlinefragebögen waren selbständig durch die Auskunftspersonen auszufüllen. Die Zweitbefragungen sollten bei allen Auskunftspersonen etwa 7 bis 9 Monate nach den Erstbefragungen erfolgen, sodass in der Zwischenzeit ein hinreichend hohes Maß an Nutzungserfahrungen für die geplanten Längsschnittuntersuchungen gesammelt werden konnte.

Abbildung 19 illustriert noch einmal das Studiendesign. Die in diesem Arbeitspaket zu bearbeitende Zweitbefragungsrunde wird dabei durch den roten Rahmen eingefasst.

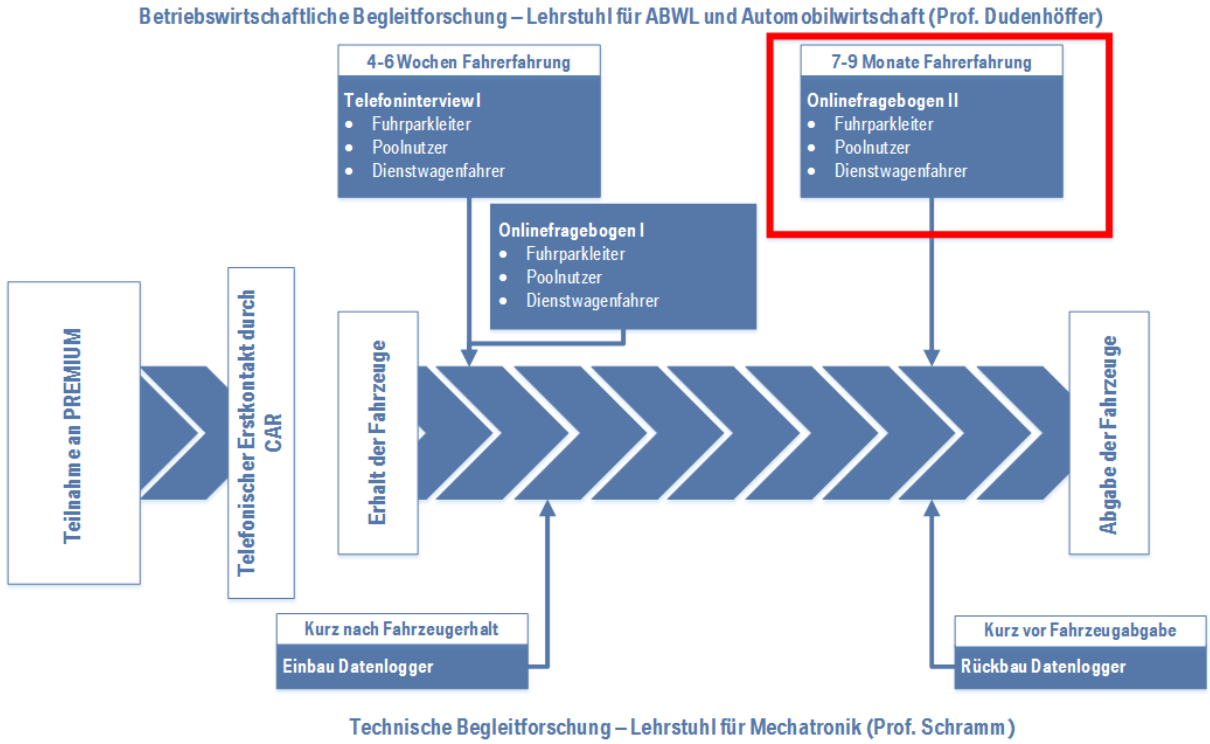


Abbildung 19: Studiendesign mit Fokus auf Arbeitspaket 4400

Programmierung der Fragebögen, Pre-Test, Überarbeitung

Wiederum mussten die aus dem zuvor erstellten Forschungsplan abgeleiteten Fragebogendesigns für die Zweitbefragungsrunde in die verwendete Befragungssoftware Questback Unipark® programmiert werden. Der Programmierung folgte eine zweiwöchige Pre-Testphase, während der die Fragebögen im Testmodus der Befragungssoftware kritisch hinsichtlich der Bearbeitungsdauer, der Verständlichkeit und Fehlerfreiheit der Forschungsfragen sowie der programmierten Fragebogenstruktur geprüft wurden. Die 7 Pre-Testteilnehmer aus Forschung und Praxis konnten wieder Kritik und Verbesserungsvorschläge zur präsentierten Umsetzung jeder Forschungsfrage elektronisch anmerken. Die Anmerkungen wurden anschließend geprüft und die Fragebögen entsprechend überarbeitet. Insgesamt waren zwei Bearbeitungsschleifen zur Finalisierung der Forschungsfragesets notwendig. Im Anschluss daran konnten die Fragebögen für alle drei Gruppen von Auskunftspersonen in der Befragungssoftware als personalisierte Projekte mit bekannten Stichproben aktiv geschaltet werden.

Tabelle 16 zeigt die Themenbereiche und eine Auswahl der Forschungsfragen der Zweitbefragungsrunde (t_1) für die drei Gruppen von Auskunftspersonen:

Tabelle 16: Themenbereiche der Zweitbefragungsrunde nach Gruppen von Auskunftspersonen

Themenbereiche der Zweitbefragungsrunde nach Gruppen von Auskunftspersonen			
	Fuhrparkleiter	**Dienstwagennutzer**	**Poolfahrzeugnutzer**
Onlinefragebogen II	**Vor- und Nachteile** **Zufriedenheit** *Globalurteile* *Detailurteile* *Range Extender* *…* **Gesamturteil** *Einstellungen* *Regret* *Weiterempfehlung* *…* **Nutzungsprofile Elektro** *Streckenlängen* *Nutzungshäufigkeit* *Fahrtzwecke* *…* **Mobilitätsurteil** *Flexibilität* *Fahrtenanteil* *…*	**Vor- und Nachteile** **Zufriedenheit** *Globalurteile* *Detailurteile* *Range Extender* *…* **Gesamturteil** *Einstellungen* *Regret* *Weiterempfehlung* *…* **Nutzungsprofile Elektro** *Streckenlängen* *Nutzungshäufigkeit* *Privatnutzung* *Fahrtzwecke* *…* **Mobilitätsurteil** *Flexibilität* *Fahrtenanteil* *Nichtnutzung* *…*	**Vor- und Nachteile** **Zufriedenheit** *Globalurteile* *Detailurteile* *Range Extender* *…* **Gesamturteil** *Einstellungen* *Weiterempfehlung* *…* **Nutzungsprofil Elektro** *Streckenlängen* *Nutzungshäufigkeit* *Fahrtzwecke* *…* **Mobilitätsurteil** *Flexibilität* *Fahrtenanteil* *Nichtnutzung* *…*

Themenbereiche der Zweitbefragungsrunde nach Gruppen von Auskunftspersonen			
	Fuhrparkleiter	**Dienstwagennutzer**	**Poolfahrzeugnutzer**
	Ladeverhalten *Geladener Strom* *Ladezeitpunkt/-häufigkeit/-orte* *Detailurteil* *Ladeorte* *…* **Kosten** *Gesamtbetriebskosten* *Infrastrukturkosten* *…* **Ausblick** *Verbesserungspotential* *Künftige Anschaffungen* *Flotte 2020* *…*	**Ladeverhalten** *Geladener Strom* *Ladezeitpunkt/-häufigkeit/-orte* *Detailurteil* *Ladeorte* *…* **Kosten** *Gesamtbetriebskosten* *Infrastrukturkosten* *Geldwerter Vorteil* *…* **Ausblick** *Verbesserungspotential* *Künftige Anschaffungen* *…*	**Ladeverhalten** *Ladezeitpunkt/-häufigkeit/-orte* *Detailurteil* *Ladeorte* *…* **Ausblick** *Verbesserungspotential* *Künftige Nutzung* *…*

Die Kategorien enthielten überwiegend Forschungsfragen zur Nutzung der Projektfahrzeuge, da die Auskunftspersonen bei der Beantwortung der Forschungsfragen nun auf Erfahrungen aus mehrmonatigem Gebrauch im Berufsalltag zurückgreifen konnten.

Vorgehensweise bei der zweiten Kontaktaufnahme

Vor der Zweitbefragungsrunde waren die Auskunftspersonen durch die Teilnahme an der Erstbefragungsrunde vollständig bekannt. Weiterhin wurde durch die ausschließliche Nutzung von Onlinefragebögen nur noch eine Kommunikationsform von Befragungen angewendet. Dies geschah überwiegend aus zeitlichen Gründen, da in Folge der Mittelaufstockung die anzusprechenden Stichproben die ursprünglichen Planungen deutlich überstiegen.

Die Kenntnis der anzusprechenden Stichprobe ermöglichte vereinfachte Prozesse bei der Zweitbefragungsrunde: Durch die Programmierung der Fragebogendesigns in die Befragungssoftware als sogenannte personalisierte Umfragen,[15] konnte die Kontaktaufnahme und große Teile der Maßnahmen zur Teilnahme-Erinnerung automatisiert werden. Hierfür musste zunächst für jede der 3 Gruppen von Auskunftspersonen eine standardisierte Liste mit relevanten Kontaktdaten als Teilnehmerverwaltung erstellt werden. Die standardisierten Kontaktlisten wurden anschließend in der Befragungssoftware hochgeladen werden. Die Aussendung von Einladungen zur Teilnahme und mehrere Wellen von Erinnerungsmails konnten durch Rückgriff der Befragungssoftware auf die Daten in der Teilnehmerverwaltung automatisiert erfolgen.

Zur Kontaktaufnahme musste eine Einladungsmail-Vorlage konzipiert werden. Die Vorlage musste alle relevanten Informationen für die Auskunftspersonen bereitstellen, um den Onlinefragebogen selbständig ausfüllen zu können. Abbildung 20 zeigt beispielhaft eine html-Einladungsmail für die Gruppe der Poolnutzer. Die durch #-Symbole eingefassten Textelemente stellen Platzhalter dar. Durch den automatisierten Software-Rückgriff auf die Teilnehmerverwaltung wurden die Platzhalter mit den persönlichen Daten des jeweiligen Adressaten beim Versand befüllt.

[15] Bei personalisierten Umfragen wird die Stichprobe vorab durch eine definierte Anzahl bekannter Auskunftspersonen gebildet.

Forschungsprojekt
PREMIUM

Guten Tag #u_title# #u_name#,

zunächst möchte ich mich im Namen des gesamten PREMIUM-Teams bei Ihnen für die erfolgreiche Teilnahme an unserer ersten Befragungsrunde herzlich bedanken!

Wie im Telefoninterview der ersten Runde angekündigt, möchten wir Sie nun ein zweites Mal zu Ihren Erfahrungen mit dem Elektroauto im Berufsalltag befragen.
Aus Zeitgründen haben wir uns entschieden, die Nachbefragung ausschließlich in Form eines Onlinefragebogens durchzuführen (**Dauer ca. 40-45 Minuten**)
- es findet also **kein** weiteres Telefoninterview mehr statt.

Erst nach Abschluss des Onlinefragebogens ist Ihr Datensatz komplett und für uns auswertbar. Deshalb ist es besonders wichtig,
dass Sie den Onlinefragebogen **zeitnah und vollständig ausfüllen**.

Sie erreichen den Fragebogen unter folgendem Link:

https://ww3.unipark.de/uc/befragung-der-nutzer-von-premium-elektroautos/

Auf der ersten Seite geben Sie bitte **#code# als Ihre persönliche Fahrerkennung an.**

Ich empfehle Ihnen den Fragebogen "in einem Rutsch" durchzuarbeiten. Wenn Sie den Fragebogen unterbrechen,
achten Sie bitte darauf den Browser **nicht** zurückzusetzen. Der Fragebogen ist rund um die Uhr für Sie erreichbar.

Bei **Fragen, Anmerkungen oder Anregungen** zu unserem Projekt, können Sie sich gerne an mich wenden. Meine Kontaktdaten finden Sie unten.

Ich bedanke mich noch einmal für Ihre Mühe und Ihr Engagement und wünsche Ihnen beruflich und privat alles Gute!

Mit freundlichen Grüßen

CAR - Center Automotive Research

Universität Duisburg-Essen

Bismarckstr. 90 BC

Raum BC 308

47057 Duisburg

Fon: +49 (0) 203 / 379 – 3625

Fax. +49 (0) 203 / 379 – 1654

Forschungsprojekt
PREMIUM

(Plug-In-, Range-Extender- und Elektrofahrzeuge unter realen Mobilitätsumständen: Infrastruktur, Umweltbedingungen und Marktakzeptanz)

Mail: premium@uni-due.de

Webseite: www.uni-due.de/car

Abbildung 20: Mailvorlage zur Einladung von Poolnutzern (Zweitbefragung)

Nach gleichem Muster wurden zur Steigerung der Ausschöpfungsquoten Erinnerungsmail-Vorlagen konzipiert. Der Mahnungsprozess bestand aus zwei Erinnerungsmails mit identischem Wortlaut, die jeweils 7 bzw. 14 Tage nach der ursprünglichen Einladungsmail an Auskunftspersonen automatisiert versendet werden konnten. Eine Erinnerungsmail erhielt eine Auskunftsperson nur dann, wenn die wöchentliche

Kontrolle des Befragungsfortschritts über die Teilnehmerverwaltung nicht den Befragungsstatus „beendet“ oder „beendet nach Unterbrechung“ ergab. In diesem Fall war der jeweilige Onlinefragbogen noch nicht vollständig ausgefüllt.

Sofern auch die zweite Erinnerungsmail nicht zur Bearbeitung des Onlinefragebogens innerhalb einer weiteren Frist von zwei Wochen führte, wurden die Auskunftspersonen noch einmal telefonisch durch Projektmitarbeiter der Universität Duisburg-Essen kontaktiert. Dies betraf schlussendlich jedoch nur 11 Auskunftspersonen aus der Gruppe der Fuhrparkleiter, sodass den implementierten Prozessen zur Steigerung der Ausschöpfungsquoten eine hohe Wirksamkeit zu attestieren war.

Abbildung 21 zeigt den Ablauf der zweiten Kontaktaufnahmen inklusive des implementierten automatischen Mahnwesens:

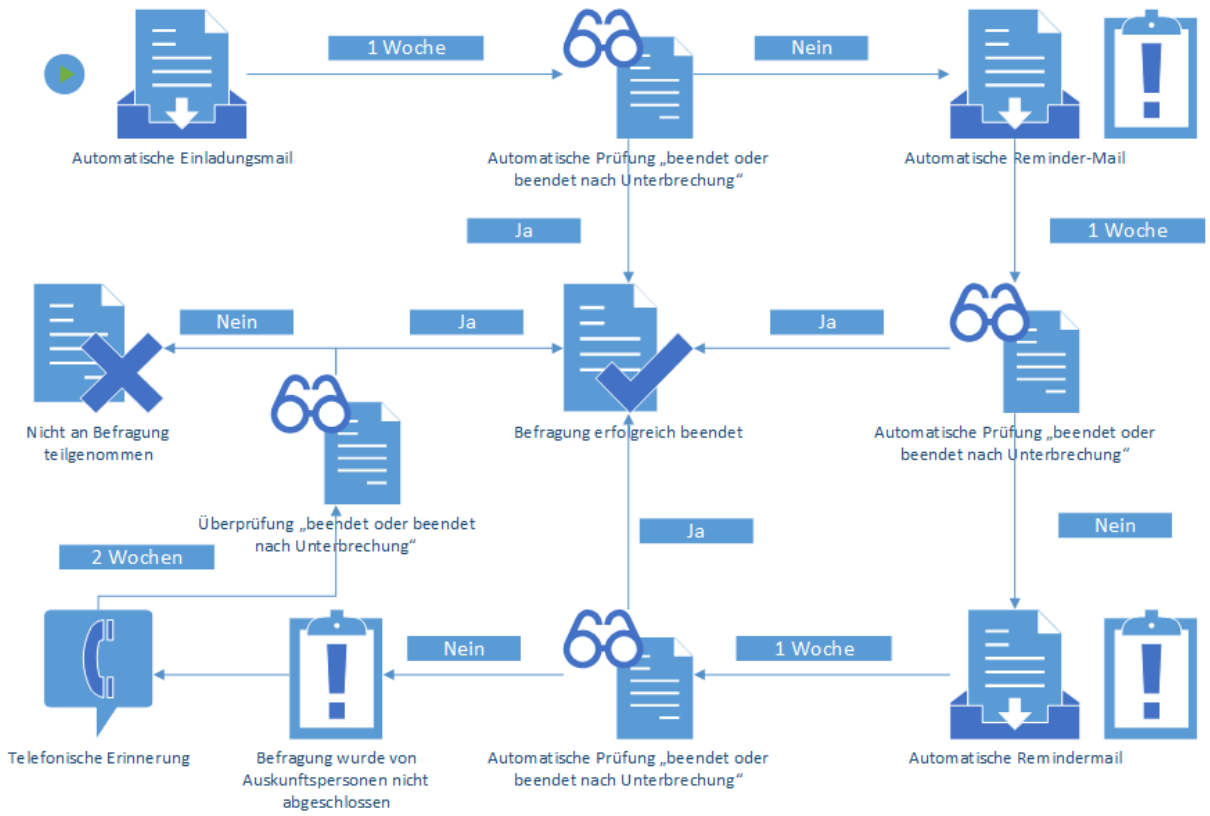


Abbildung 21: Ablauf der zweiten Kontaktaufnahme und des automatischen Mahnwesens

3.1.11 AP 4410 Erhebung der subjektiven Daten durch die Feldphase begleitende Nachbefragungen der Fuhrparknutzer

Ziele des Arbeitspakets 4410

Das Ziel des Arbeitspakets war die Umsetzung der Zweitbefragungsrunden bei den Gruppen Dienstwagen- und Poolnutzer in den Feldphasen.

Report der Feldphase der Dienstwagennutzer-Zweitbefragung

Wiederum wurde der Befragungsfortschritt der Dienstwagennutzer kontinuierlich während der Feldphase erfasst. Insgesamt wurden ab dem 05.10.2016 106 Auskunftspersonen zur Dienstwagennutzer-Zweitbefragung eingeladen. Die Einladungen der Auskunftspersonen erfolgten in der ersten Oktoberhälfte 2016 in drei Wellen zu je 27, 35 und 33 Teilnehmern.

Abbildung 22 zeigt den Befragungsfortschritt während der fünfeinhalb-monatigen Feldphase vom 05.10.2016 bis zum 15.02.2017. Dabei werden die Auskunftspersonen mit den Stati „noch nicht eingeladen“, „eingeladen“ und „beendet“ kumuliert im Zeitablauf gegeneinander aufgerechnet:

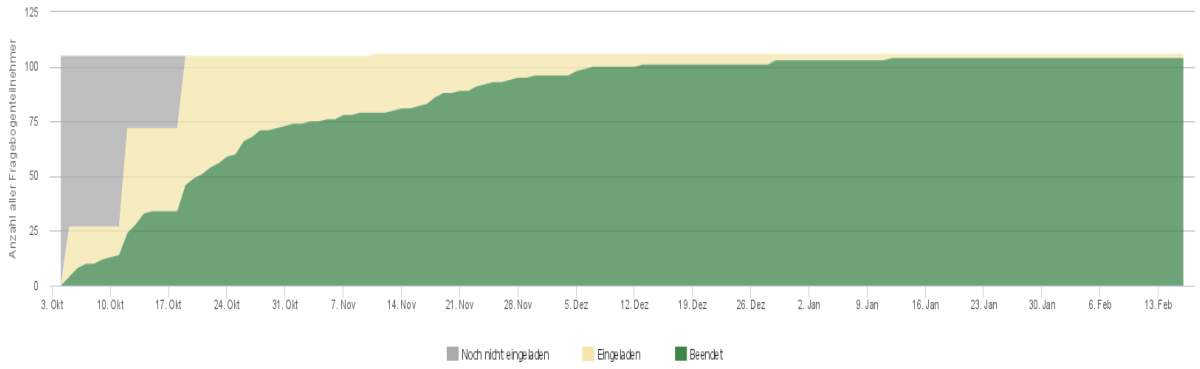


Abbildung 22: Anzahl abgeschlossener Onlinefragebögen während der Feldzeit (Zweitbefragung Dienstwagennutzer)

Wie aus der Abbildung deutlich wird konnte eine hohe Ausschöpfungsquote von 98% erreicht werden: Insgesamt wurden 104 Onlinefragebögen von Dienstwagennutzern abgeschlossen. Eingeladen wurden 106 Auskunftspersonen, die zuvor sowohl das erste Telefoninterview als auch den ersten Onlinefragebogen (AP 4200) abgeschlossen hatten.

Tabelle 17 bereitet den Feldbericht und die statistischen Kennzahlen der Zweitbefragung von Dienstwagennutzern noch einmal auf.

Tabelle 17: Statistik zur Dienstwagennutzer-Onlinebefragung (Zweitbefragung)

Feldbericht		
Die angezeigten Daten beziehen sich auf die Feldzeit vom 04.10.2016 bis 15.02.2017 (134 Tage)		
	Absolute Zahlen	Prozent
Gesamtsample (Brutto 1)	106	100,00%
Nettobeteiligung	104	98,11%
Ausschöpfungsquote	98,11%	
Beendigungsquote	98,11%	
Statistische Kennzahlen		
Mittlere Bearbeitungszeit (arithm. Mittel)	0h 44m 54s	
Mittlere Bearbeitungszeit (Median)	0h 42m 4s	
Durchschnittliche Teilnehmeranzahl pro Tag	2.26	
Durchschnittliche Teilnehmeranzahl pro Woche	8.00	

Der vollständige Durchlauf des Dienstwagennutzer-Onlinefragebogens dauerte im Mittel etwa 45 Minuten. Pro Tag wurde der Onlinefragebogen rechnerisch von 2,3 Dienstwagennutzern abgeschlossen – pro Woche waren es während der Feldphase durchschnittlich 8 erfolgreiche Teilnahmen.

Report der Feldphase der Poolnutzer-Zweitbefragung

Der Befragungsfortschritt der Poolnutzer wurde während der Feldphase ebenfalls laufend erfasst. Insgesamt wurden ab dem 05.07.2016 352 Auskunftspersonen zur Poolnutzer-Zweitbefragung eingeladen, die zuvor sowohl das erste Telefoninterview als auch den ersten Onlinefragebogen (AP 4200) abgeschlossen hatten. Die Einladungen der Auskunftspersonen erfolgten zwischen Anfang Juli und Anfang November in 5 Wellen zu je 19, 90, 109, 119 und 15 Teilnehmern.

Abbildung 23 zeigt den Befragungsfortschritt während der siebeneinhalb-monatigen Feldphase vom 05.07.2016 bis zum 15.02.2017. Dabei werden die Auskunftspersonen mit den Stati „noch nicht eingeladenen“, „eingeladen“, „unterbrochen“ und „beendet“ kumuliert im Zeitablauf gegeneinander aufgerechnet:

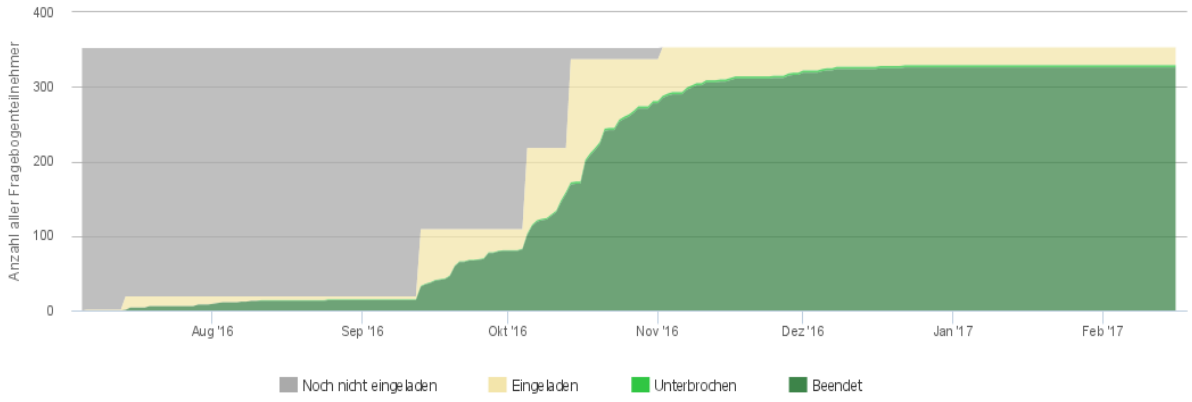


Abbildung 23: Anzahl abgeschlossener Onlinefragebögen während der Feldzeit (Zweitbefragung Poolnutzer)

Wie aus Abbildung 23 deutlich wird konnte wiederum eine hohe Ausschöpfungsquote von 93% erreicht werden: Insgesamt wurden 326 Onlinefragebögen von Poolnutzern abgeschlossen.

Tabelle 18 bereitet den Feldbericht und die statistischen Kennzahlen der Zweitbefragung von Poolnutzern noch einmal auf.

Tabelle 18: Statistik zur Poolnutzer-Onlinebefragung (Zweitbefragung)

Feldbericht		
Die angezeigten Daten beziehen sich auf die Feldzeit vom 05.07.2016 bis 15.02.2017 (225 Tage)		
	Absolute Zahlen	Prozent
Gesamtsample (Brutto 1)	353	100,00%
Nettobeteiligung	329	93,20%
Ausschöpfungsquote	93,20%	
Beendigungsquote	92,35%	
Statistische Kennzahlen		
Mittlere Bearbeitungszeit (arithm. Mittel)	0h 38m 28s	
Mittlere Bearbeitungszeit (Median)	0h 33m 21s	
Durchschnittliche Teilnehmeranzahl pro Tag	4.77	
Durchschnittliche Teilnehmeranzahl pro Woche	15.67	

Der vollständige Durchlauf des Poolnutzer-Onlinefragebogens dauerte im Mittel etwa 38 Minuten. Pro Tag wurde der Onlinefragebogen rechnerisch von 4,8 Poolnutzern abgeschlossen – pro Woche waren es während der Feldphase durchschnittlich 15,7 erfolgreiche Teilnahmen.

Datenaufbereitung und –bereinigung

Zur Zweitbefragung wurden schließlich nur diejenigen eingeladen, deren erster Datensatz komplett war. Da die Daten in der Zweitbefragung nur durch einen Onlinefragebogen erhoben wurden, war eine Datenbereinigung innerhalb der Zweiterhebung nicht nötig. Nach der Zweitbefragung wurden dann die Stichproben der Erst- und Zweitbefragung nochmals mit Hilfe der Identifikationskennung verglichen und Datensätze für die Endauswertung erneut bereinigt. Somit erhält man nach der Zweitbefragung die in Tabelle 19 dokumentierten Stichprobengrößen.

Tabelle 19: Endgültige Stichprobengrößen nach t1

	T0	CAWI 2 (t1)
Poolnutzer	360	326
User Chooser	108	104
Fuhrparkleiter	245	242

Auch in der Zweitbefragung wurden gegebenenfalls Einzelfragen erneut bereinigt, sofern dies inhaltlich benötigt wurde.

3.1.12 AP 4420 Erhebung der subjektiven Daten durch die Feldphase begleitende Nachbefragungen der Flottenmanager

Ziele des Arbeitspakets 4420

Das Ziel des Arbeitspakets war die Umsetzung der Zweitbefragungsrunde der Fuhrparkleiter.

Report der Feldphase der Fuhrparkleiter-Zweitbefragung

Schließlich musste der Befragungsfortschritt bei der dritten Gruppe von Auskunftspersonen, den Fuhrparkleitern, während der Feldphase laufend erfasst werden. Ab dem 21.11.2016 wurden 245 Auskunftspersonen zur Fuhrparkleiter-Zweitbefragung eingeladen, die zuvor sowohl das erste Telefoninterview als auch den ersten Onlinefragebogen (AP 4200) abgeschlossen hatten. Die Einladungen der Auskunftspersonen erfolgten in der dritten November-Woche in 2 Wellen zu je 128 und 117 Teilnehmern.

Abbildung 24 zeigt den Befragungsfortschritt während der knapp dreimonatigen Feldphase vom 21.11.2016 bis zum 15.02.2017. Dabei werden die Auskunftspersonen mit den Stati „noch nicht eingeladenen“, „eingeladen“ und „beendet“ kumuliert im Zeitablauf gegeneinander aufgerechnet:

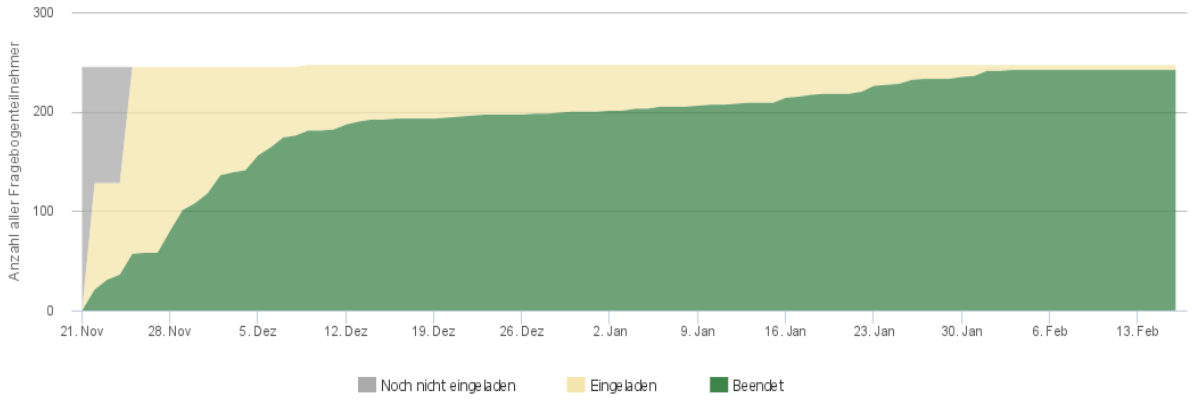


Abbildung 24: Anzahl abgeschlossener Onlinefragebögen während der Feldzeit (Zweitbefragung Fuhrparkleiter)

Wie aus Abbildung 24 deutlich wird konnte wiederum eine hohe Ausschöpfungsquote von 98% erreicht werden: Insgesamt wurden 242 Onlinefragebögen von Fuhrparkleitern abgeschlossen.

Tabelle 20 bereitet den Feldbericht und die statistischen Kennzahlen der Zweitbefragung von Fuhrparkleitern noch einmal auf.

Tabelle 20: Statistik zur Fuhrparkleiter-Onlinebefragung (Zweitbefragung)

Feldbericht		
Die angezeigten Daten beziehen sich auf die Feldzeit vom 21.11.2016 bis 15.02.2017 (86 Tage)		
	Absolute Zahlen	Prozent
Gesamtsample (Brutto 1)	247	100,00%
Nettobeteiligung	242	97,98%
Ausschöpfungsquote	97,98%	
Beendigungsquote	97,98%	
Statistische Kennzahlen		
Mittlere Bearbeitungszeit (arithm. Mittel)	1h 1m 46.29s	
Mittlere Bearbeitungszeit (Median)	0h 55m 13s	
Durchschnittliche Teilnehmeranzahl pro Tag	4.84	
Durchschnittliche Teilnehmeranzahl pro Woche	22.00	

Der vollständige Durchlauf des Poolnutzer-Onlinefragebogens dauerte im Mittel etwa 61 Minuten. Pro Tag wurde der Onlinefragebogen rechnerisch von 4,8 Fuhrparkleitern abgeschlossen – pro Woche waren es während der Feldzeit durchschnittlich 22 erfolgreiche Teilnahmen.

Datenaufbereitung und –bereinigung

Die umgesetzten Maßnahmen zur Datenaufbereitung und –bereinigung sind in AP 4410 bereits dargestellt.

3.1.13 AP 4500 Statistische Auswertung inklusive des Abgleichs der Messdaten mit den subjektiven Daten aus den Nutzer-/ Flottenmanagerbefragungen

Ziele des Arbeitspakets 4500

Ziele des Arbeitspakets waren die quantitative Auswertung des in den Erst- und Zweitbefragungsrunden generierten Datenmaterials und die Interpretation der Ergebnisse.

Im Folgenden werden die wichtigsten Befragungsergebnisse für jede der drei Gruppen von Auskunftspersonen präsentiert. Befragt wurden Fuhrparkleiter, User Chooser (Dienstwagenfahrer) und Flottennutzer. Weiterhin werden die wichtigsten Forschungsergebnisse diskutiert.

3.1.14 AP 4510 Statistische Auswertung von Befragungen der Auskunftsgruppe Fuhrparkleiter

Stichprobenbeschreibung

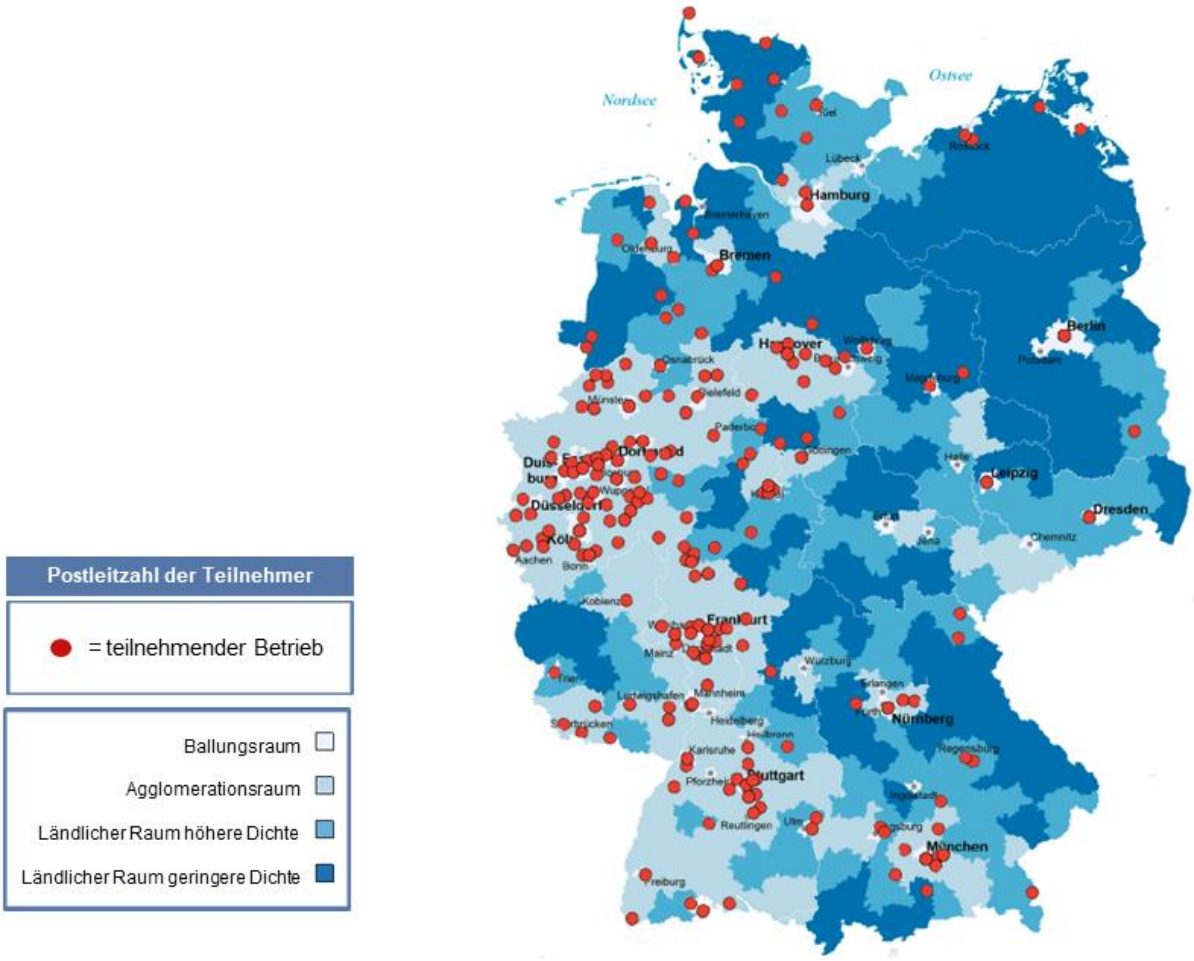


Abbildung 25: Räumliche Verteilung der Betriebe

Die am Projekt teilnehmenden Erhebungseinheiten (Betriebe) sind über das gesamte Bundesgebiet verteilt. Es dominieren jedoch die Ballungs- bzw. Agglomerationsräume, wie Abbildung 25: Räumliche Verteilung der Betriebe zeigt.

Es wurden 532 Projektfahrzeuge verschiedener Marken und Modelle eingesetzt. Der BMW i3 ist mit 403 Exemplaren das dominierende Modell in der Stichprobe. 60% der Projektautos sind Elektroautos mit Range Extender und 40% sind reinelektrische Modelle. 89% der Projektautos werden als Poolfahrzeuge genutzt. Abbildung 26 stellt die Verteilung der Antriebsarten und der Fahrzeugmodelle grafisch dar.

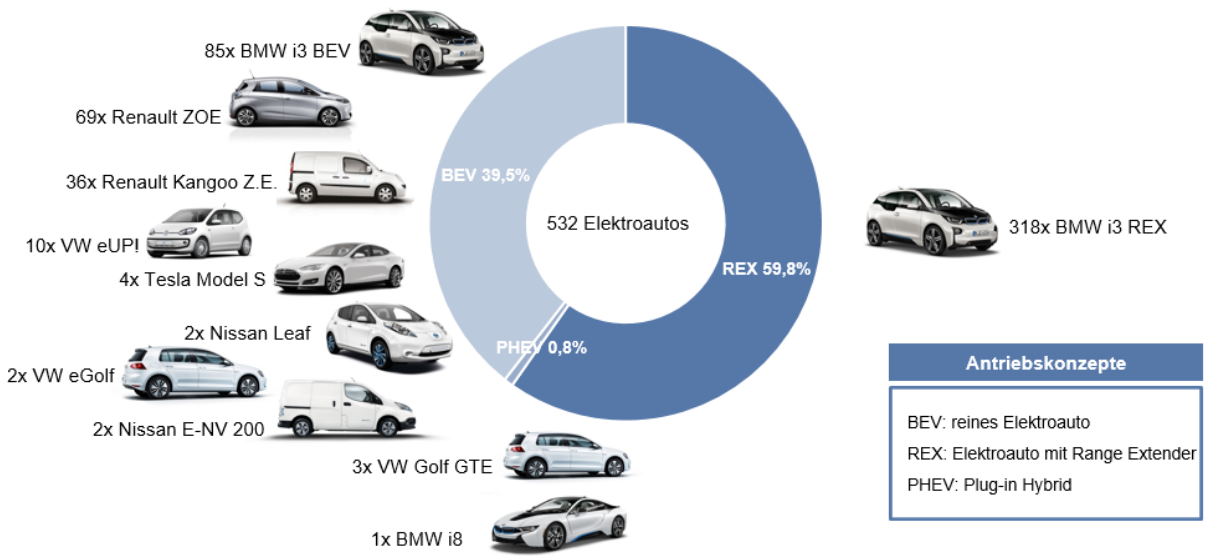


Abbildung 26: Verteilung der Fahrzeugmodelle und Antriebsarten, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_F(t_1) = 242$.

Nur 14% der befragten 242 Fuhrparkleiter sind Frauen, während 50% einen akademischen Abschluss haben. 68% der befragten Fuhrparkleiter hatten die Gelegenheit vor dem Projektstart schon andere Elektroautos bei Probe-, Test- und Privatfahrten kennenzulernen. Die Teilnehmer attestieren sich einen guten Wissenstand zum Thema Elektromobilität.

Die Betriebe kommen vor allem aus der öffentlichen Verwaltung, Verteidigung und Sozialversicherungen (21%) sowie aus dem verarbeitenden Gewerbe (15%). Über 50% sind Großunternehmen mit mehr als 250 Mitarbeitern. Abbildung 27 illustriert die Verteilung der Betriebe nach Anzahl von Firmen-Pkw und Anzahl von Fahrzeugnutzern:

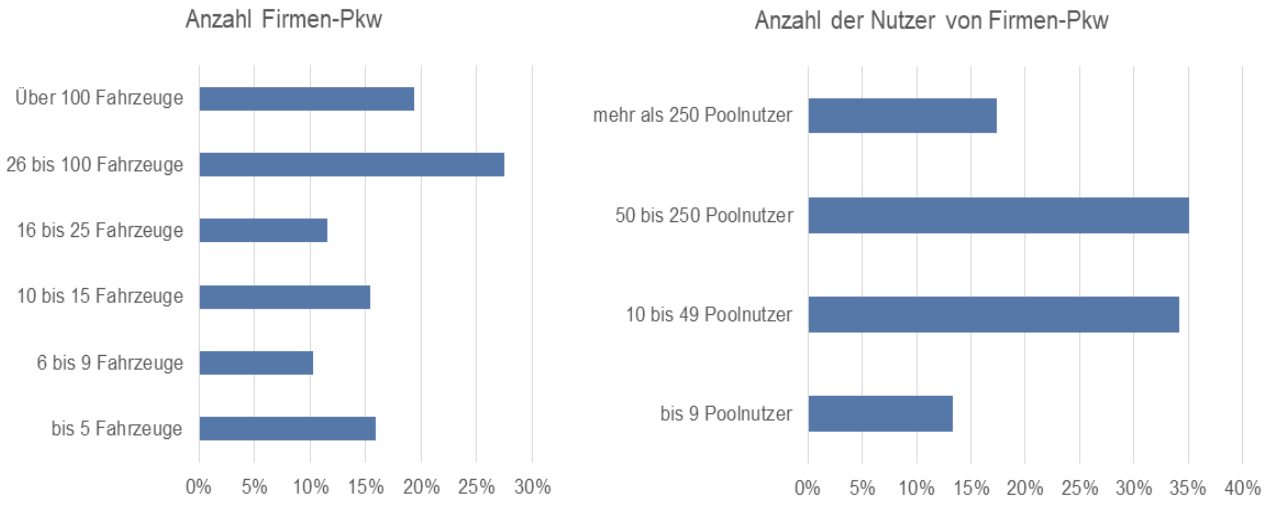


Abbildung 27: Verteilung der Betriebe nach Anzahl von Firmen-Pkw und Anzahl von Fahrzeugnutzern, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_F(t_1) = 233$, $n_F(t_1) = 225$.

Etwa 75% der Betriebe gehören zum relevanten Flottenmarkt mit mindestens 10 Firmen-Pkw. Knapp über 50% der Betriebe bezeichnen sich als eher kostenbewusst, wenn es um die Beschaffung neuer Firmen-Pkw geht. Für mehr als die Hälfte der Betriebe sind die Projektautos die ersten und aktuell einzigen Elektroautos.

Ziele und Motive

Die wichtigsten Ziele des Fuhrparkmanagements der befragten Betriebe sind allgemein: Maximierung der Mobilität der Flottennutzer, Reduktion der Unterhaltskosten und Maximierung der wirtschaftlichen Flexibilität. 86% der befragten Fuhrparkleiter geben an, dass es konkrete Emissionsziele für den eigenen Fuhrpark gibt.

Abbildung 28 zeigt die genannten Anschaffungsmotive der befragten Fuhrparkleiter:

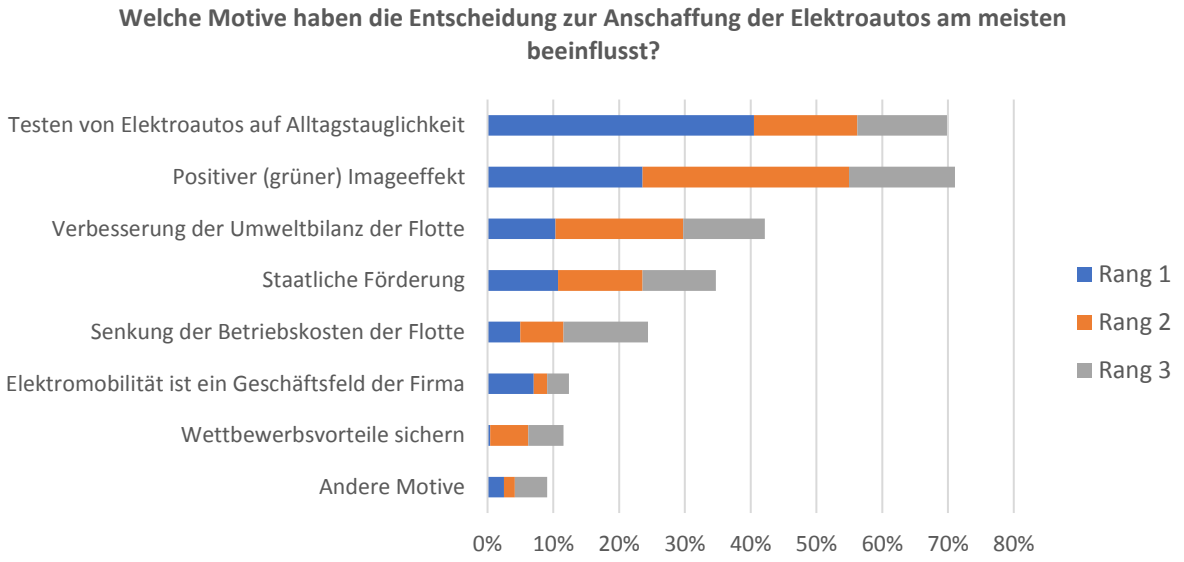


Abbildung 28: Anschaffungsmotive, Befragungszeitpunkt: t_0; $n_F(t_0) = 244$.

Das Testen von Elektroautos auf Alltagstauglichkeit und der grüne Imageeffekt stellen nach Angaben der befragten Fuhrparkleiter die wichtigsten Motive ihres Betriebs zur Anschaffung von Elektroautos dar: 71% bzw. 70% der befragten Fuhrparkleiter nennen den Imageeffekt bzw. Test auf Alltagstauglichkeit unter den TOP3-Motiven zur Anschaffung. Der Test auf Alltagstauglichkeit wurde mit Abstand am häufigsten auf Platz 1 der drei wichtigsten Motive gesetzt. Die staatliche Förderung war nur für 35% der teilnehmenden Betriebe ein TOP3-Motiv der Anschaffung: Die Mehrheit der Betriebe hätte demnach vermutlich auch ohne Förderung Elektroautos angeschafft.

Beschaffung

Kostenbezogene Kaufkriterien sind den befragten Fuhrparkleitern bei der Beschaffung neuer Firmen-Pkw am wichtigsten, daneben ist die hohe Relevanz von umweltbezogenen Kaufkriterien auffällig. Die Entscheidung zur Anschaffung von Elektroautos ist in hohem Maße durch die Beteiligung und die Initiative

der jeweiligen Geschäftsführung bedingt. Umweltfreundlichkeit und grünes Image waren als Kaufkriterien bei der Beschaffung der Projektautos wichtiger als die Alltagstauglichkeit oder die Anschaffungskosten, wie Abbildung 29 illustriert. Wenn die Anschaffungskosten jedoch ein Anschaffungskriterium waren, dominierten sie andere Kriterien.

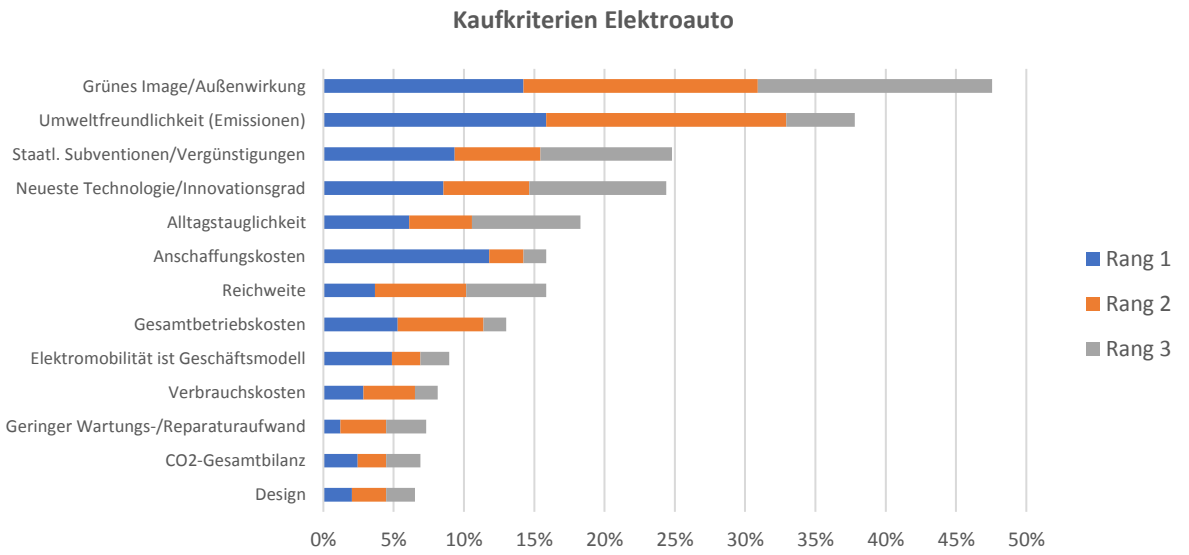


Abbildung 29: Kaufkriterien Elektroauto, Befragungszeitpunkt: t_0; $n_F(t_0) = 244$.

Die Beschaffung der Projektautos war mehrheitlich von vornherein eine Anschaffung von elektrischen Antrieben. 55% der befragten Fuhrparkleiter geben an, dass bei der Beschaffung der Elektroautos andere Kaufkriterien herangezogen wurden als bei konventionellen Firmen-Pkw in ihrem Betrieb üblich. Bei 39% waren die gleichen Kaufkriterien entscheidungsrelevant. Bei 41% galten für die Elektroautos andere Beschaffungsregeln als bei der Anschaffung konventioneller Firmen-Pkw. So haben bspw. nur 26% für ihre Elektroautos mehrere Vergleichsangebote von unterschiedlichen Leasinganbietern eingeholt. 74% haben dies nicht getan. Die Beschaffung der Projektautos erfolgte vielfach als Sonderfall abseits des üblichen Vorgehens bei der Beschaffung von Firmen-Pkw.

Nutzungsprofil

Nicht jedes Nutzungsprofil von Firmen-Pkw ist für den Einsatz aktueller Elektroautos geeignet. Daher wurden von 92% der befragten Fuhrparkleiter Vorüberlegungen angestellt, um herauszufinden für welche Aufgaben im Betrieb Elektroautos eingesetzt werden können. Abbildung 30 zeigt die Aspekte zur Beurteilung der Eignung eines Nutzungsprofils für Elektroautos:

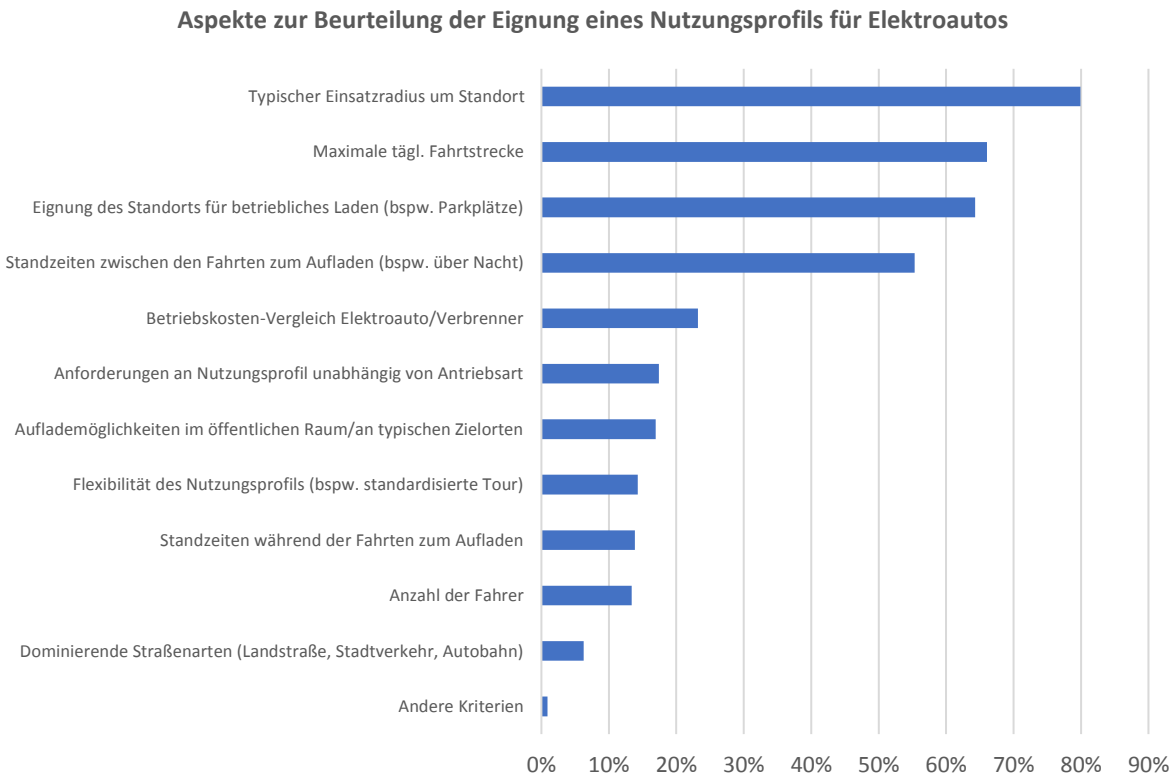


Abbildung 30: Aspekte zur Beurteilung der Eignung eines Elektroautos, Befragungszeitpunkt: t_0; $n_F(t_0) = 244$.

Die befragten Fuhrparkleiter prüften im Vorfeld der Anschaffung der Elektroautos am häufigsten verschiedene betriebliche Nutzungsprofile hinsichtlich des typischen Einsatzradius der Firmen-Pkw (80%) rund um den Standort. Zwischen 66% und 55% bezogen in ihre Vorüberlegungen die maximale tägliche Fahrtstrecke verschiedener Nutzungsprofile, die Eignung von Standorten für betriebliches Laden und die üblichen Standzeiten (Fahrzeugauslastung) zwischen den Fahrten ein. 23% beurteilten die Eignung eines Nutzungsprofils für den Einsatz von Elektroautos auch über einen Betriebskostenvergleich.

Durchschnittlich werden in einem Jahr zu 65% einfache Streckenlängen bis zu 100 km mit konventionellen Firmen-Pkw zurückgelegt. Nur etwa jede dritte Fahrtstrecke der Mitarbeiter ist demnach von Start bis Ziel länger als 100 km. Jede siebte Fahrtstrecke (15%) ist mindestens 200 km einfache Strecke lang, 4% der Fahrtstrecken sogar über 500 km. Die befragten Fuhrparkleiter schätzen, dass die Elektroautos häufiger für einfache Fahrtstrecken bis zu 100 km genutzt wurden. Streckenlängen darüber machen bei allen Firmen-Pkw anteilig 35% pro Jahr aus, bei den Elektroautos sind es geschätzt nur 8% (Abbildung 31). Einfache Streckenlängen von 100 km und mehr werden mit den Elektroautos fast vollständig gemieden, bei konventionellen Firmen-Pkw kommt das dagegen nicht selten vor.

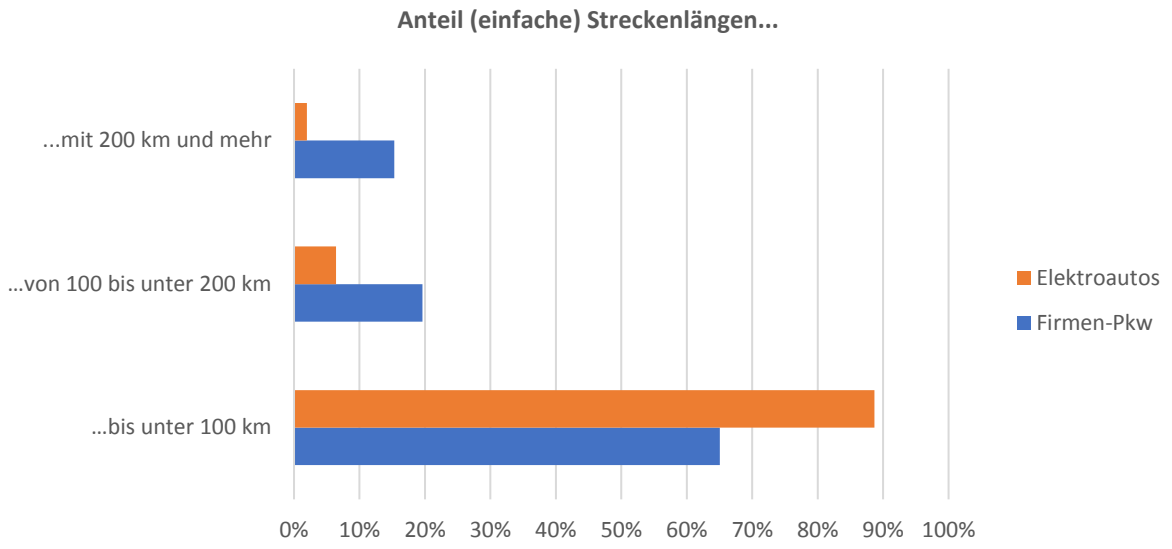


Abbildung 31: Anteile einfacher Streckenlängen von konventionellen Firmen-Pkw und Elektroautos im Vergleich, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_F(t_1) = 233$.

Die befragten Fuhrparkleiter schätzen, dass auf zwei von drei Touren (67%) mit den Elektroautos weniger als 50 km einfache Strecke zurückgelegt werden. Jede fünfte zurückgelegte einfache Streckenlänge (21%) ist zwischen 50 bis unter 100 km lang (Abbildung 32). Bei einfachen Streckenlängen „zwischen 50 bis unter 100 km“ ist ein signifikanter Unterschied zwischen den BMW i3 BEV und BMW i3 REX-Betrieben feststellbar. Der Anteil des Intervalls liegt bei REX-Betrieben höher. Über 100 km einfache Streckenlänge wird allerdings auch mit Range Extender-Modellen anteilsmäßig kaum zurückgelegt.

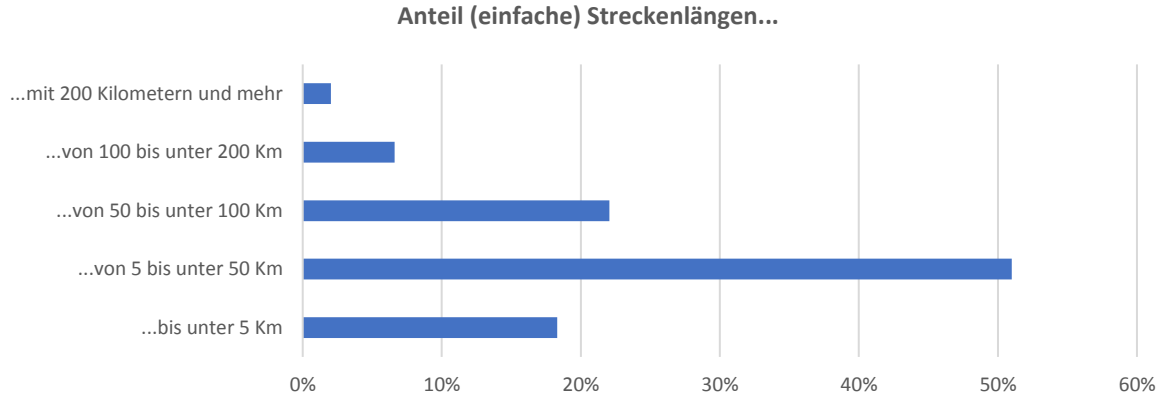


Abbildung 32: Anteile einfacher Streckenlängen, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_F(t_1) = 235$.

In 65% der Betriebe werden die Elektroautos mindestens einmal pro Tag genutzt. 70% der Elektroautos absolvieren zwischen 51 km und 300 km pro Woche. Die häufigsten Fahrtzwecke von Elektroautos sind denjenigen von konventionellen Poolfahrzeugen relativ ähnlich.

Vor- und Nachteile

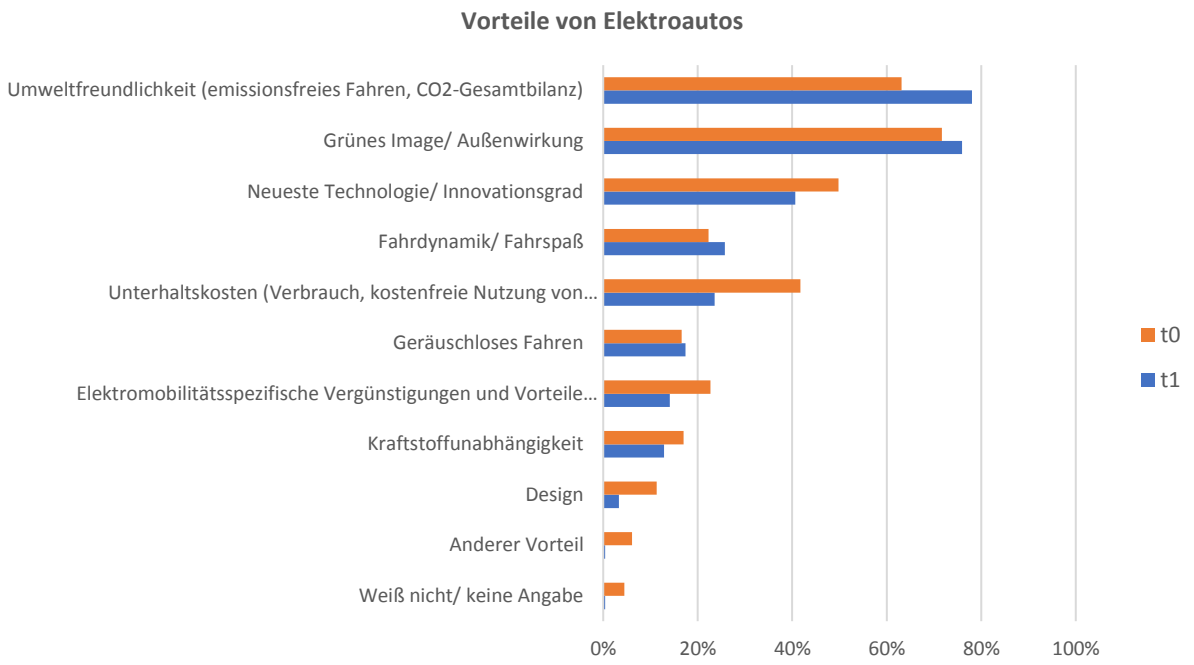


Abbildung 33: Vorteile von Elektroautos, Befragungszeitpunkt: t_0, t_1; $n_F(t_0) = 247$, $n_F(t_1) = 241$.

Unter den drei wichtigsten Vorteilen von Elektroautos werden von den befragten Fuhrparkleitern am häufigsten Umweltfreundlichkeit (78%), grünes Image (76%) und der neueste Technologie- und Innovationsgrad (41%) genannt (Abbildung 33). Das gilt für die Erst- und die Zweibefragung. Dagegen werden die Unterhaltskosten nach mehrmonatiger Nutzung der Elektroautos deutlich seltener unter den drei wichtigsten Vorteilen genannt. Nach 41,5% zur Erstbefragung, zählen zur Zweitbefragung nur noch 23,5% der befragten Fuhrparkleiter Verbrauchs-, Wartungs-, Kfz-Steuer- und Versicherungskosten, sowie die kostenfreie Nutzung von Ladesäulen, zu den drei wichtigsten Vorteilen von Elektroautos.

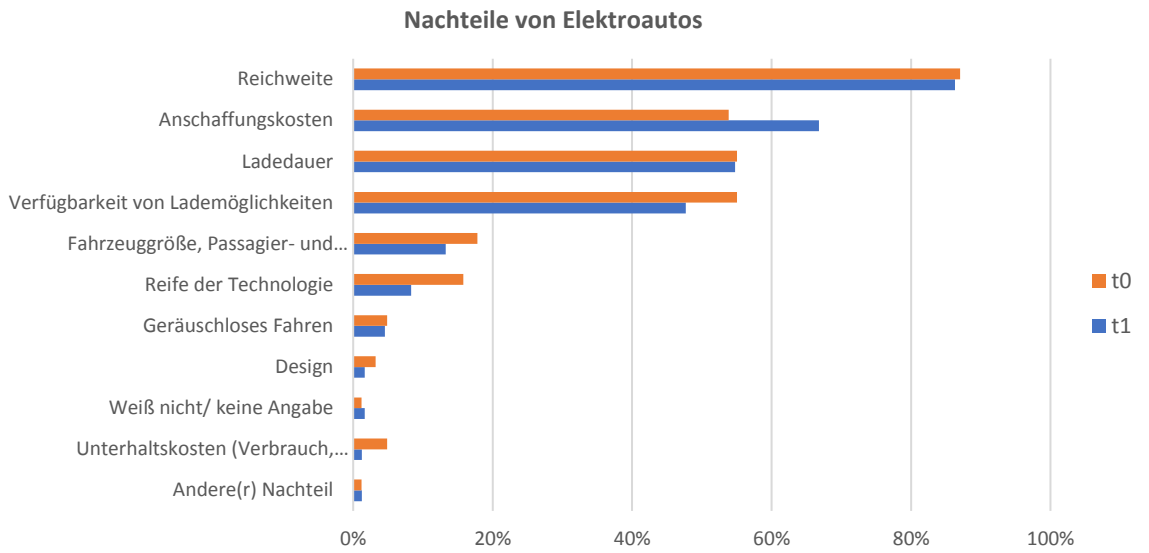


Abbildung 34: Nachteile von Elektroautos, Befragungszeitpunkt: $t_0, t_1; n_F(t_0) = 247, n_F(t_1) = 241$.

Sowohl am Beginn, als auch nach mehrmonatigen Einsatz der Elektroautos im Betrieb, sehen die befragten Fuhrparkleiter 4 zentrale Nachteile von Elektroautos: Reichweite (87%), Anschaffungskosten (67%), Ladedauer (55%) und Verfügbarkeit von Lademöglichkeiten (48%). Es handelt sich also um die typischen Verdächtigen (Abbildung 34). Dabei wird der Aspekt Anschaffungskosten nach mehrmonatigen Einsatz der Elektroautos deutlich häufiger (67%) unter den 3 wichtigsten Nachteilen genannt als zuvor (54%). Die Unterhaltskosten werden dagegen mit zunehmender Erfahrung deutlich seltener darunter genannt.

Zufriedenheit

Mehr als ein Viertel der befragten Fuhrparkleiter (27%) ist mit den eigenen Elektroautos nach mehrmonatiger Nutzung vollkommen zufrieden. Weiterhin sind 55% mit dem Elektroauto weitgehend zufrieden und 13% eher zufrieden.

Abbildung 35 zeigt die globalen Zufriedenheitsurteile der Fuhrparkleiter getrennt für die Modelle BMW i3 rein elektrisch und BMW i3 Range Extender:

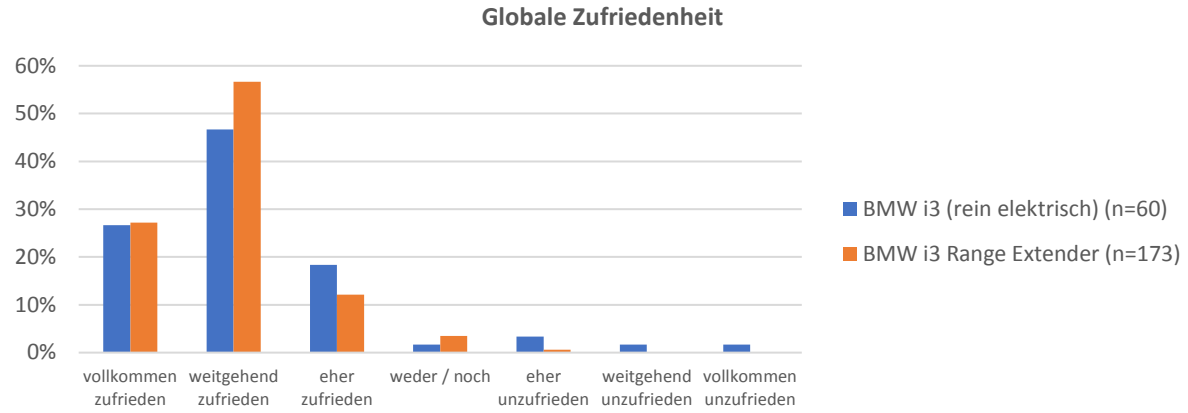


Abbildung 35: Zufriedenheitsurteile der Fuhrparkleiter für BMW i3 rein elektrisch und BMW i3 Range Extender, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_F(t_1) = n$.

Jeweils 27% der befragten Fuhrparkleiter sind mit ihren BMW i3 BEV- und REX-Modellen nach mehrmonatiger Nutzung vollkommen zufrieden. Mit dem BEV-Modell sind weitere 47% weitgehend zufrieden, beim REX-Modell sind es sogar 57%. Die Unterschiede sind jedoch nicht statistisch signifikant.

Mit dem Kernproblem der Reichweite ist etwa die Hälfte der befragten Fuhrparkleiter unzufrieden, etwa 40% geben modellübergreifend an, mit der aktuellen Reichweite auszukommen. Die Unterschiede beim Reichweitenurteil sind zwischen BMW i3 BEV und i3 REX signifikant. Die höhere kombinierte Reichweite des BMW i3 REX resultiert in einer höheren Zufriedenheit mit dem Aspekt Reichweite unter den befragten Fuhrparkleitern. Mit der Alltagstauglichkeit ihrer Elektroautos sind die befragten Fuhrparkleiter trotz der Reichweitenprobleme modellübergreifend mehrheitlich zufrieden.

Mobilitätsurteil

Im Mobilitätsurteil wird die Unzufriedenheit der befragten Fuhrparkleiter mit der Flexibilität deutlich: Nur 4% der Teilnehmer geben an, mit der Flexibilität ihrer Elektroautos voll und ganz zufrieden zu sein. Der mit Elektroautos nicht zu bewältigende Fahrtenanteil beträgt im Durchschnitt immerhin 41,5%.

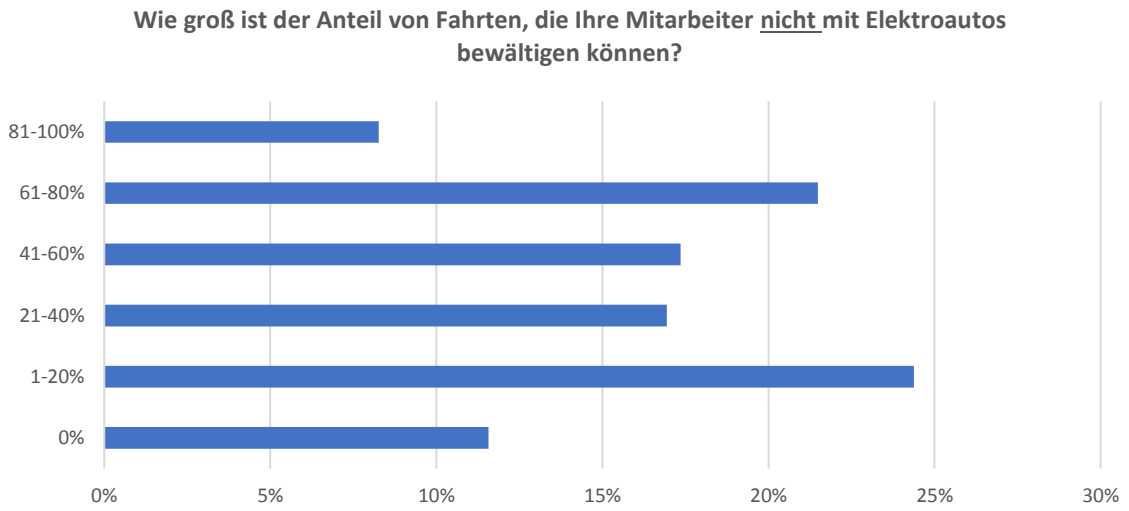


Abbildung 36: Mit Elektroautos abdeckbarer Fahrtenanteil, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_F(t_1) = 242$.

Nur 12% der befragten Fuhrparkleiter geben an, dass theoretisch alle Fahrten mit Firmen-Pkw durch Elektroautos abgedeckt werden können (Abbildung 36). 82% der befragten Fuhrparkleiter sagen, dass es tatsächlich Fahrten im Betrieb gibt, die sie gerne mit Elektroautos erfüllen würden, es aber aus verschiedenen Gründen nicht können.

Zum Thema Reichweite hat die die Westendorp-Methode[16] die in Abbildung 37 dargestellten Ergebnisse für die Fuhrparkleiter errechnet.

[16] Das van Westendorp-Verfahren ist eine weit verbreitete Methodik zur Abfrage von Preisbereitschaft. Zur van Westendorp-Methode genauer: Vgl. Van Westendorp (1976)

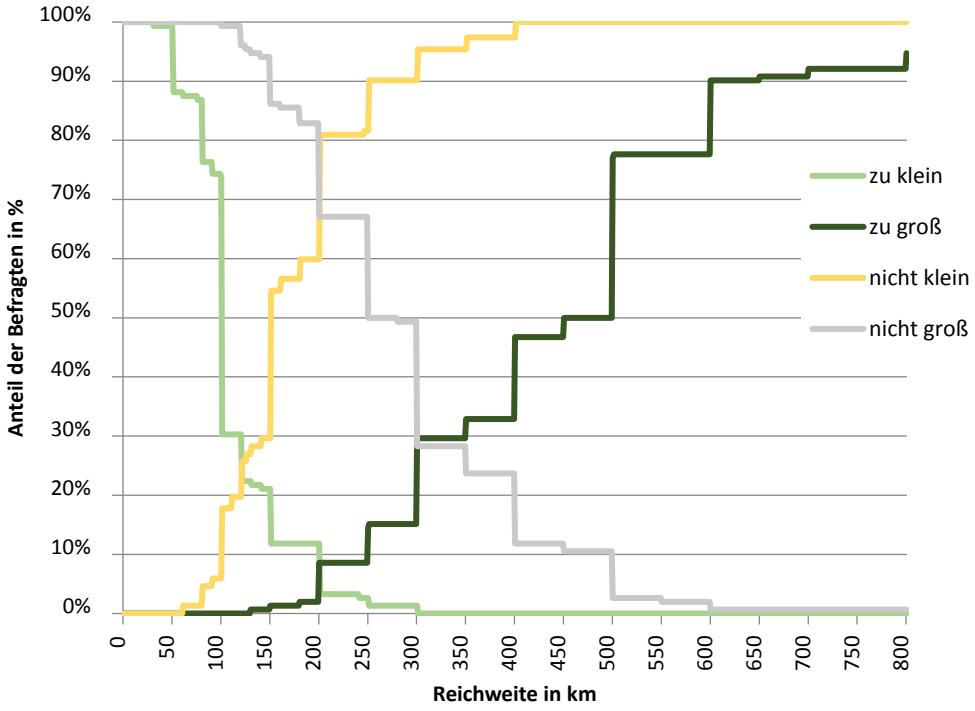


Abbildung 37: Van Westendorp Reichweiten Flottenleiter, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_F(t_1) = 152$.

Durch diese Methode wurde erhoben, dass die optimale Reichweite aus Sicht der Flottenleiter 201 km beträgt. Den Rahmen für generell akzeptable Reichweiten bilden Reichweiten von 121 km bis 300 km.

Geladener Strom und Ladeverhalten

Grundsätzlich legen die befragten Fuhrparkleiter darauf Wert, dass ihre Elektroautos mit Strom aus regenerativen Energien geladen werden (82%). 60% der Betriebe nutzen dazu entweder Ökostrom oder auch Strom aus eigener Erzeugung zum Laden der Elektroautos. Jedoch stimmt mehr als ein Viertel (28%) der gegenpoligen Aussage völlig, weitgehend oder eher zu, dass Elektroautos auch ohne die Verwendung grünen Stroms umweltfreundlich genug sind.

Bei nahezu allen befragten Fuhrparkleitern (96%) ist die Firma ein üblicher Ladeort der Elektroautos. Nur 13% bzw. 12% der Teilnehmer geben an, dass ihre Elektroautos auch an öffentlichen Ladesäulen bzw. zu Hause beim Mitarbeiter üblicherweise aufgeladen werden. Der Verzicht auf das öffentliche Laden in der Praxis geschieht nicht wegen mangelnder Relevanz öffentlicher Ladepunkte für den reibungslosen Einsatz der Elektroautos in den Betrieben, sondern wegen der kaum ausgebauten Ladeinfrastruktur. Aus Sicht des Fuhrparkmanagements ist eine adäquate Lademöglichkeit in der Firma unabdingbar, denn 87% halten das Laden in der Firma für sehr wichtig. Eine relevante Minderheit der befragten Fuhrparkleiter hält die Ladezeiten für nicht vereinbar mit dem Tagesablauf der Mitarbeiter (45%). Mehr als die Hälfte (52%) der befragten Fuhrparkleiter bewertet den Ladeort „zu Hause beim Mitarbeiter“ als eher unwichtig bis überhaupt nicht wichtig. Aufgrund notwendiger Abrechnungsprozesse, steuerrechtlicher Hürden und dem Nutzungsprofil von Poolfahrzeugen ist das nachvollziehbar.

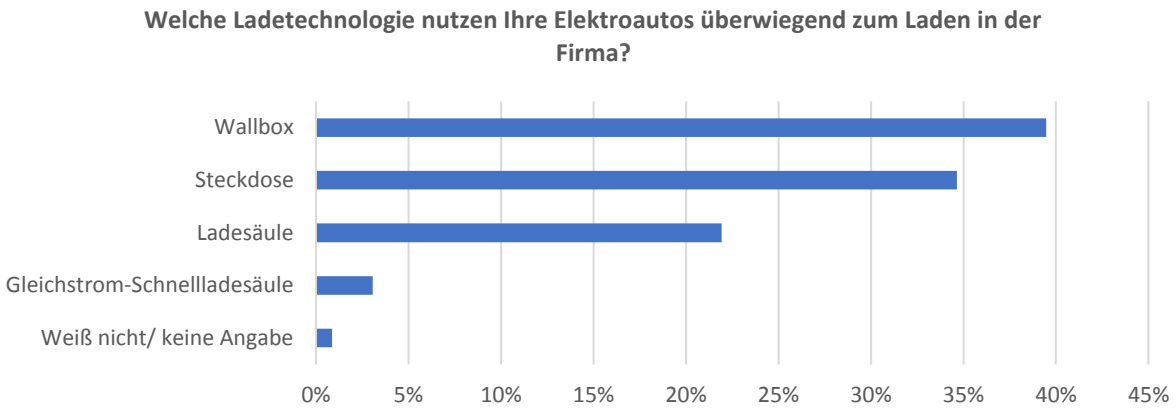


Abbildung 38: Ladetechnologie in der Firma, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_F(t_1) = 228$.

60% der teilnehmenden Betriebe haben ihre betrieblichen Lademöglichkeiten gemeinsam mit den Projektautos angeschafft. Insgesamt 62% der befragten Fuhrparkleiter geben an, dass sie über eine speziell für Elektroautos konzeptionierten Lademöglichkeit in der Firma verfügen. Darunter verfügen etwa 40% über eigene Wallboxen und 22% haben betriebseigene Ladesäulen. Mehr als jeder Dritte (35%) muss noch immer mit konventionellen Steckdosen in der Firma auskommen (Abbildung 38).

Etwa jeder fünfte befragte Fuhrparkleiter (23%) ist mit den Anschaffungskosten der betrieblichen Ladeinfrastruktur unzufrieden: 9% sind weitgehend oder vollkommen unzufrieden, 14% geben an eher unzufrieden zu sein: Der Median der Kosten für Ladeinfrastruktur pro Fahrzeug liegt bei Ladesäulen und Wallboxen bei etwa 2000 € pro Fahrzeug. Spitzenlasten, fehlerhafte Software und Hardwareprobleme haben die befragten Fuhrparkleiter offenbar kaum erfahren müssen, denn mit der Zuverlässigkeit des Ladevorgangs gab es nur wenige Probleme: 28% sind dahingehend vollkommen zufrieden, 45% sind weitgehend zufrieden (Summe: 73%).

Kosten

Für nahezu alle befragten Fuhrparkleiter (87%) spielen die Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership) bei der Fahrzeuganschaffung grundsätzlich eine Rolle. Die geschätzten monatlichen Gesamtbetriebskoten der Projektautos liegen mehrheitlich unterhalb von 400 € (Abbildung 39).

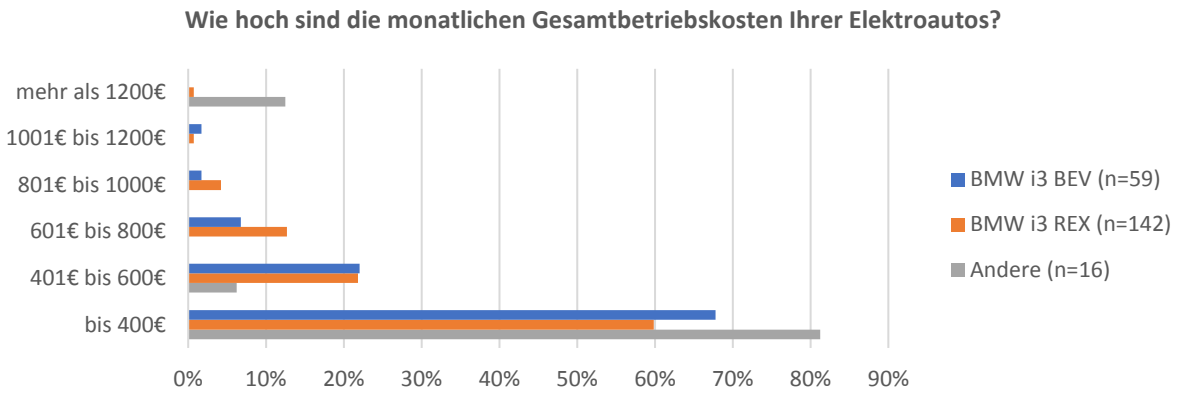


Abbildung 39: Monatliche Gesamtbetriebskosten der Projektfahrzeuge Angaben in Prozent, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_F(t_1) = 217$.

Dies ist vor allem auf die geförderte Leasingrate, aber auch auf die Dominanz von Kompaktmodellen und günstige Industriestrompreise zurückzuführen. Die geschätzten monatlichen Gesamtbetriebskosten des reinelektrischen BMW i3 liegen tendenziell unterhalb der geschätzten Gesamtbetriebskosten des Range Extender-Modells, obwohl der Förderbetrag pro Fahrzeug bei REX-Modellen höher lag. Der „Kosten-Peak“ über 1200 € (13%) ist durch die hochpreisigen Modelle Tesla Model S und BMW i8 verursacht.

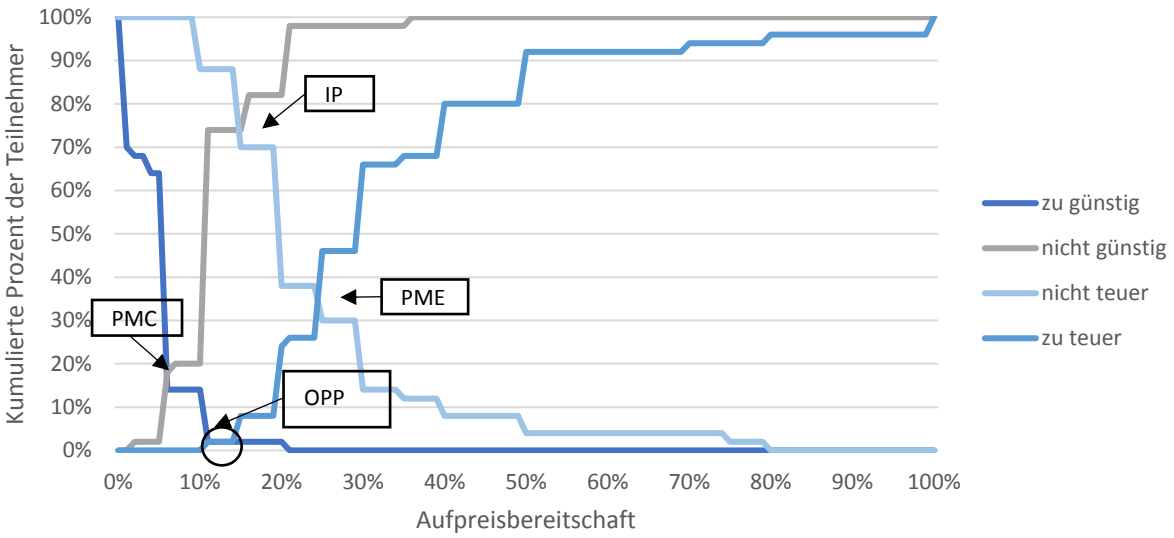


Abbildung 40: Aufpreisbereitschaft, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_F(t_1) = 50$.

Bei 132 von 242 befragten Fuhrparkleistern (55%) besteht aktuell keine Aufpreisbereitschaft für die Elektro-Version eines fiktiven Konversionsmodells. Die methodische Auswertung der Angaben von Fuhrparkleitern zur Bereitschaft, Aufpreise zu akzeptieren durch das van Westendorp-Verfahren liefert folgende Ergebnisse (Abbildung 40).

- Optimal Price Point (OPP): Der optimale prozentuale Aufpreis für die Elektro-Version liegt bei etwa 11% auf die monatlichen Gesamtbetriebskosten der Verbrenner-Version
- Indifference Price Point (IPP): Der indifferente Aufpreis liegt etwa bei 16%.
- Pt. Of Marginal Cheapness (PMC) und Pt. Of Marginal Expensiveness (PME) beschreiben den Rahmen für akzeptable prozentuale Aufpreise für die Elektro-Version: Unter den befragten Fuhrparkleitern mit Aufpreisbereitschaft liegt der Rahmen zwischen 7% und 25%.

Darüber hinaus sind nur 14% der befragten Fuhrparkleiter dazu bereit Dienstwagenberechtigten mit Elektroauto eine Ausgleichspauschale wegen des höheren geldwerten Vorteils zu zahlen.

Gesamturteil

Die befragten Fuhrparkleiter geben an, dass ihnen die Elektroautos am meisten bei der Imagepflege (84%) und bei der Reduktion von CO_2-Emissionen (65%) geholfen haben. Die fehlende Unterstützung bei Kernzielen – wie Kostenminimierung – bedeutet nicht automatisch Unzufriedenheit mit den Elektroautos. 85% stimmen der Aussage „Elektroautos sind für den Einsatz in meiner Firma geeignet“ nach mehrmonatiger Fahrzeugnutzung zu.

Nur 10 von 233 Fuhrparkleitern geben an, die Entscheidung zur Anschaffung der Elektroautos rückblickend zu bereuen. Eine große Mehrheit ist jedoch nach mehrmonatigem Einsatz der Meinung, dass Elektroautos nicht dazu geeignet sind, alle konventionellen Firmen-Pkw zu ersetzen. Die befragten Fuhrparkleiter haben sich nach eigenen Angaben trotzdem häufiger als sogenannte Change Agents betätigt (letzte 8 Wochen vor der Zweitbefragung). Change Agents sorgen durch positive Mundpropaganda für die Verbreitung von Innovationen in Märkten.

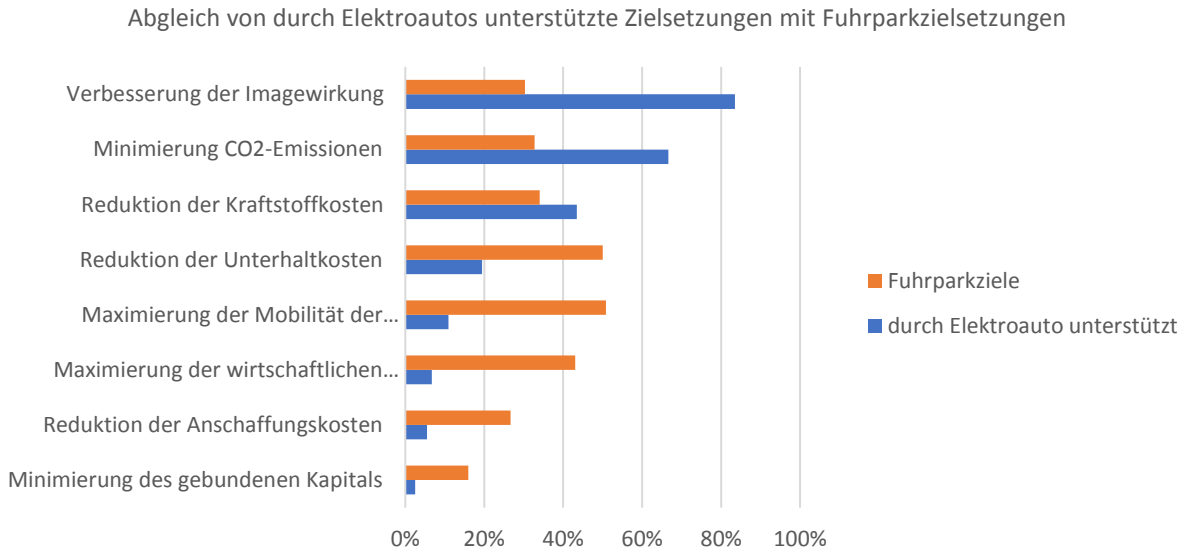


Abbildung 41: Durch Elektroauto unterstützte Zielsetzungen vs. Fuhrparkzielsetzungen, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_F(t_1) = 237$.

Stellt man die allgemeinen Flottenziele der befragten Fuhrparkleiter denen gegenüber, die durch die Elektroautos während des mehrmonatigen Nutzungszeitraums tatsächlich unterstützt wurden, wird deutlich, dass die Elektroautos die meisten Fuhrparkleiter bei der Erfüllung der wichtigsten Fuhrparkzielsetzungen nur gering unterstützt haben (Abbildung 41). Die fehlende Unterstützung bei Kernzielen bedeutet aber nicht automatisch Unzufriedenheit mit den Elektroautos, da diese bei der Erfüllung wichtiger Sekundärziele des Fuhrparkmanagements mitgewirkt haben.

22% der Fuhrparkleiter stimmen der Aussage „Elektroautos sind für den Einsatz in meiner Firma geeignet“ nach mehrmonatiger Fahrzeugnutzung uneingeschränkt zu, 33% stimmen hier weitgehend zu, weitere 30% stimmen der Aussage eher zu. Ein insgesamt positives Urteil (85% Zustimmung), wobei doch nur jeder 5. befragte Fuhrparkleiter sein positives Gesamturteil nicht mehr oder weniger einschränkt. Mögliche Gründe für das Antwortverhalten liefert ein Blick auf die Zustimmungswerte zu einer weiteren Aussage: Eine große Mehrheit der befragten Fuhrparkleiter ist nach mehrmonatigem Einsatz der Meinung, dass Elektroautos nicht dazu geeignet sind, alle konventionellen Firmen-Pkw zu ersetzen. 43% stimmen der Aussage „Als einzige Pkw im Fuhrpark meiner Firma sind Elektroautos nicht geeignet.“ uneingeschränkt zu, nur 13% lehnen sie völlig ab.

Die Einstellung gegenüber dem Einsatz als Poolfahrzeug ist deutlich positiver als gegenüber der Nutzung als Dienstwagen. Der Aussage „Elektroautos sind für den Einsatz als persönliche Dienstwagen geeignet.“ stimmen 26% eher nicht zu, je 10 % weitgehend oder gar nicht. In der Wahrnehmung vieler Fuhrparkleiter ist das typische Nutzungsprofil von persönlichen Dienstwagen (längere Fahrtstrecken, mehr Platzbedarf, häufig Privatnutzung, Komfort- und Image-Ansprüche) offenbar weniger gut mit den verfügbaren Elektroautos vereinbar.

Ausblick

Zwei Drittel der befragten Fuhrparkleiter (65%) geben an, dass der Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur aus ihrer Sicht eine effektive Maßnahme zur Steigerung der Attraktivität von Elektroautos als Firmen-Pkw ist. Tatsächlich halten 80% die öffentliche Ladeinfrastruktur für wichtig oder sehr wichtig, um Elektroautos im Betrieb ohne Einschränkungen einsetzen zu können. Aber nur jeder 9. Betrieb hat die Projektautos bisher auch an öffentlichen Ladepunkten aufgeladen. Dahinter folgen mit 38% bzw. 36% die staatliche Kaufprämie bzw. der Entfall der 1%-Dienstwagenversteuerung bei Elektro-Dienstwagen (Abbildung 42).

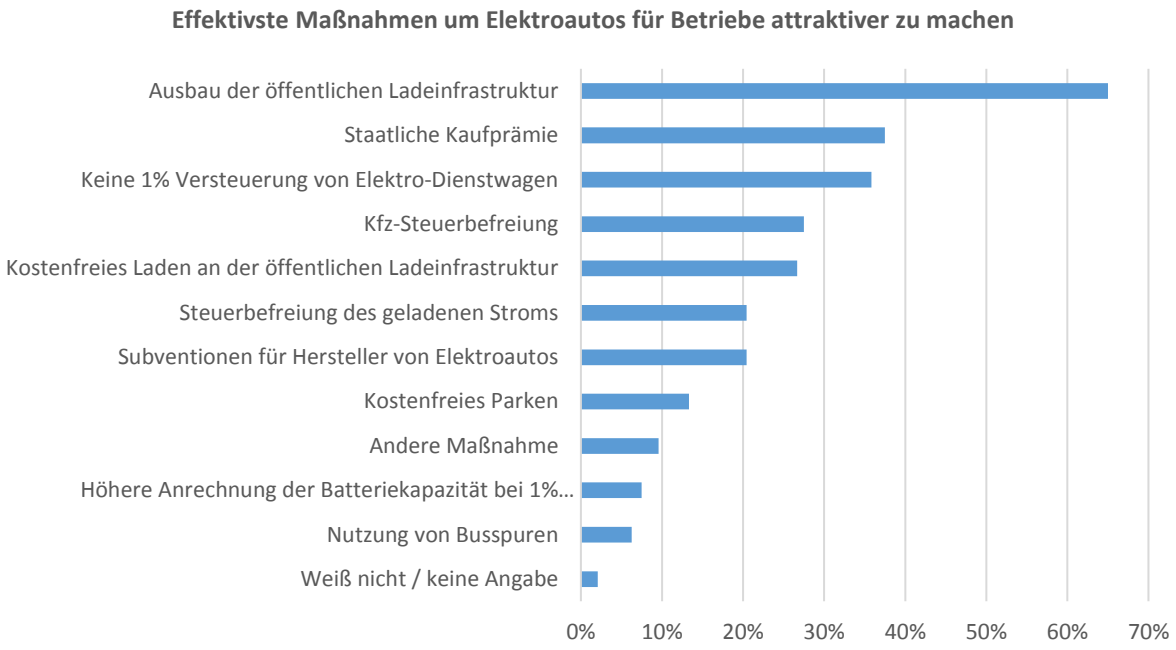


Abbildung 42: Effektive Maßnahmen zur Steigerung der Attraktivität von Elektroautos, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_F(t_1) = 240$.

166 Betriebe (71%) planen in den kommenden 3 Jahren neue Elektroautos anzuschaffen. Eine Mehrheit (57%) plant bis zu 5 Elektroautos anzuschaffen. 2 Betriebe planen in diesem Zeitraum sogar mehr als 50 neue Elektroautos anzuschaffen. 42 Betriebe (20%) werden in den kommenden 3 Jahren voraussichtlich nur Elektroautos anschaffen und auf neue Verbrenner-Modelle völlig verzichten.

Trotzdem werden auch in den kommenden 3 Jahren mehr Verbrenner-Pkw als Elektroautos neu angeschafft. Der BEV-Anteil wird bei den Neuanschaffungen auf Projekt-Niveau bleiben (44%), PHEV- werden zu Lasten von REX-Modellen zulegen.

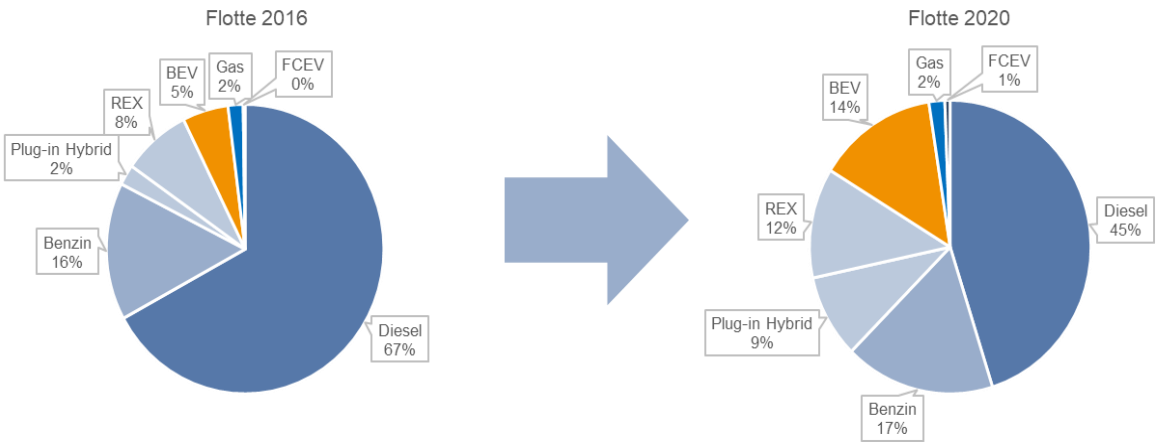


Abbildung 43: Flottenzusammenstellung aktuell vs. 2020, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_F(t_1) = 234$ (links), $n_F(t_1) = 223$ (rechts).

Die befragten 223 Fuhrparkleiter erwarten, dass ihre Flotten bereits im Jahr 2020 zu 35% aus BEV-, REX- und PHEV-Modellen bestehen werden. Die Brennstoffzelle wird auch dann noch keine Rolle spielen. Der Anstieg des Anteils von Elektroautos von 15% auf 35% geht ausschließlich zu Lasten von Dieselmodellen, deren Anteil von heute 67% innerhalb von 4 Jahren auf 45% absinken wird (Abbildung 43).

3.1.15 AP 4520 Statistische Auswertung von Befragungen der Auskunftsgruppe Dienstwagennutzer

Stichprobenbeschreibung

Die Dienstwagennutzer-Stichprobe (User Chooser-Stichprobe) setzt sich aus Dienstwagennutzern verschiedener Regionen Deutschlands zusammen. Ballungszentren und Agglomerationsräume sind ähnlich der Fuhrparkleiter Stichprobe deutlich öfter vertreten als der ländliche Raum. Abbildung 44 zeigt die Verteilung der User Chooser.

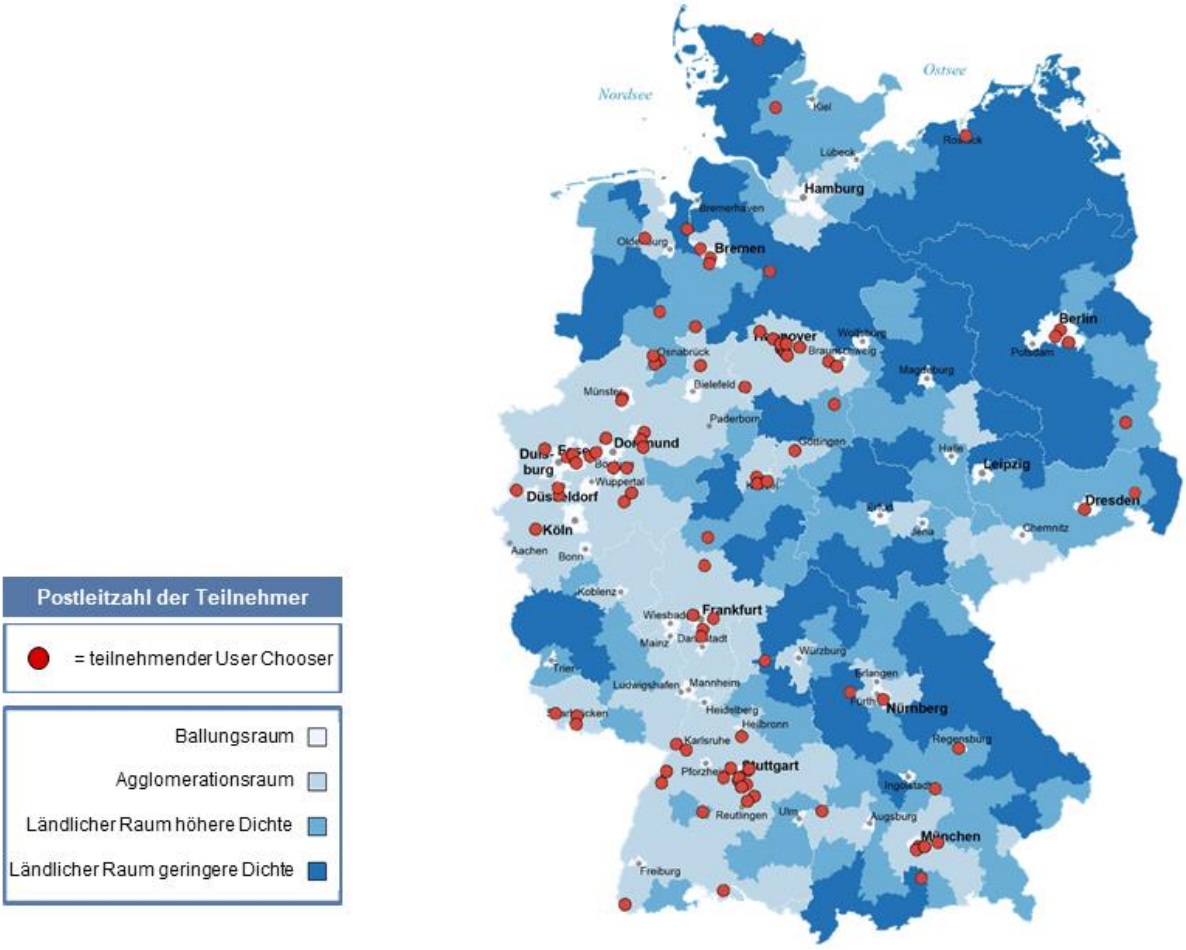


Abbildung 44: Übersicht der teilnehmenden User Chooser

Die User Chooser haben sich folgende Elektroauto-Modelle als Dienstwagen ausgesucht: Etwa 85% der Projektfahrzeuge sind mit dem BMW i3, BMW i3 REX oder BMW i8 Modelle des Herstellers BMW. Wie Abbildung 45 zeigt, stellt Tesla mit 14 Model S den am zweithäufigsten gewählten Hersteller dar.

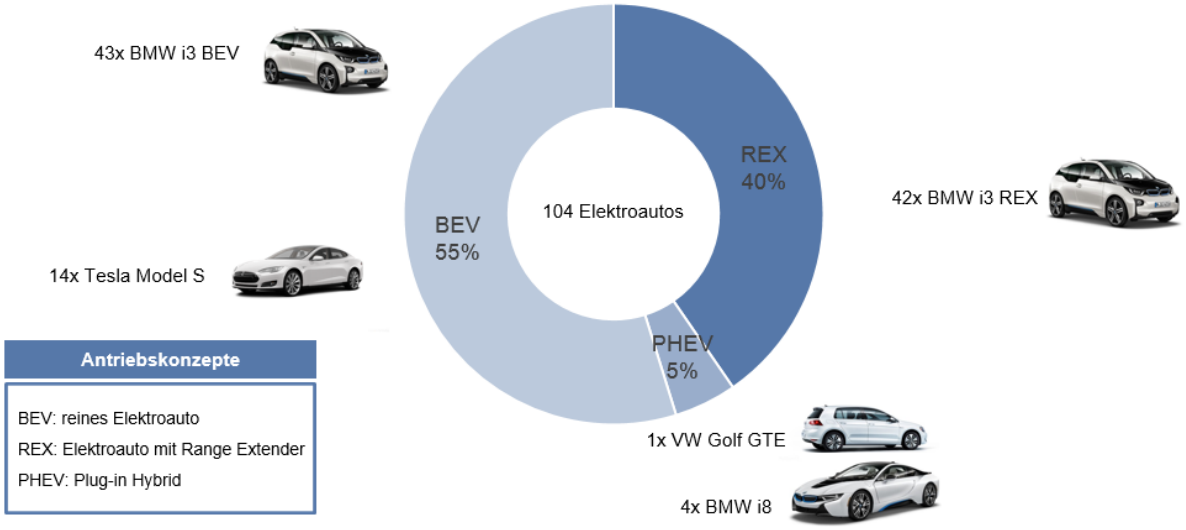


Abbildung 45: Übersicht der Elektroauto-Modelle UC

Der Anteil weiblicher User Chooser in der Stichprobe liegt bei 16%, in Deutschland beträgt der Anteil dagegen 45%. Das Durchschnittsalter der befragten User Chooser beträgt 48 Jahre (Altersdurchschnitt der Erwerbstätigen in Deutschland: 40 Jahre). Ein höheres Alter in der Stichprobe ist wenig verwunderlich: In der Regel räumen Arbeitsverträge erst auf höheren Hierarchieebenen den Anspruch auf einen persönlichen Dienstwagen mit Privatnutzung ein. Der älteste Teilnehmer ist 67 Jahre alt, der jüngste Teilnehmer ist 26 Jahre alt.

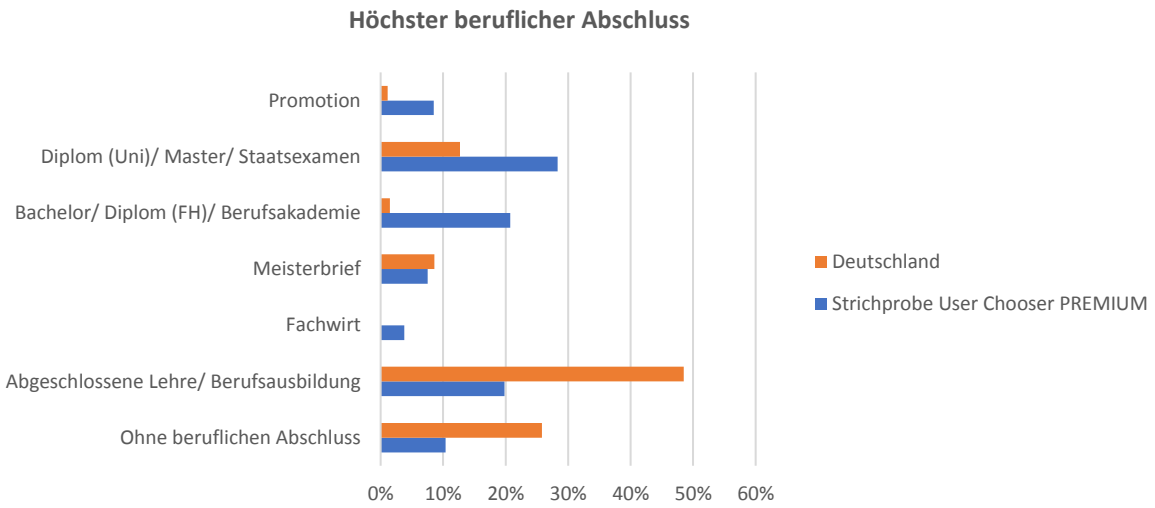


Abbildung 46: Höchster beruflicher Abschluss, Befragungszeitpunkt: t_0; $n_{UC}(t_0) = 105$.

Abbildung 46 zeigt die Verteilung des höchsten beruflichen Abschlusses der User Chooser im Vergleich zu allen Erwerbstätigen in Deutschland. Die befragten User Chooser haben einen höheren beruflichen Bildungsstand als der Durchschnitt der Erwerbstätigen in Deutschland. Fast 60% haben einen akademischen Grad erlangt (9% Promotion, 28% Diplom/Master, 21% Bachelor). Nur jeder 10. User Chooser hat keinen beruflichen Abschluss und jeder 5. eine abgeschlossene Berufsausbildung oder Lehre. Drei Viertel der befragten User Chooser sind entweder Eigentümer (63%) oder angestellte Geschäftsführer (12%). Lediglich 6% der befragten User Chooser haben gar keine Leitungsfunktion inne.

Abbildung 47 illustriert das Haushaltsnettoeinkommen der befragten User Chooser für verschiedene Einkommensklassen im Vergleich zu Deutschland:

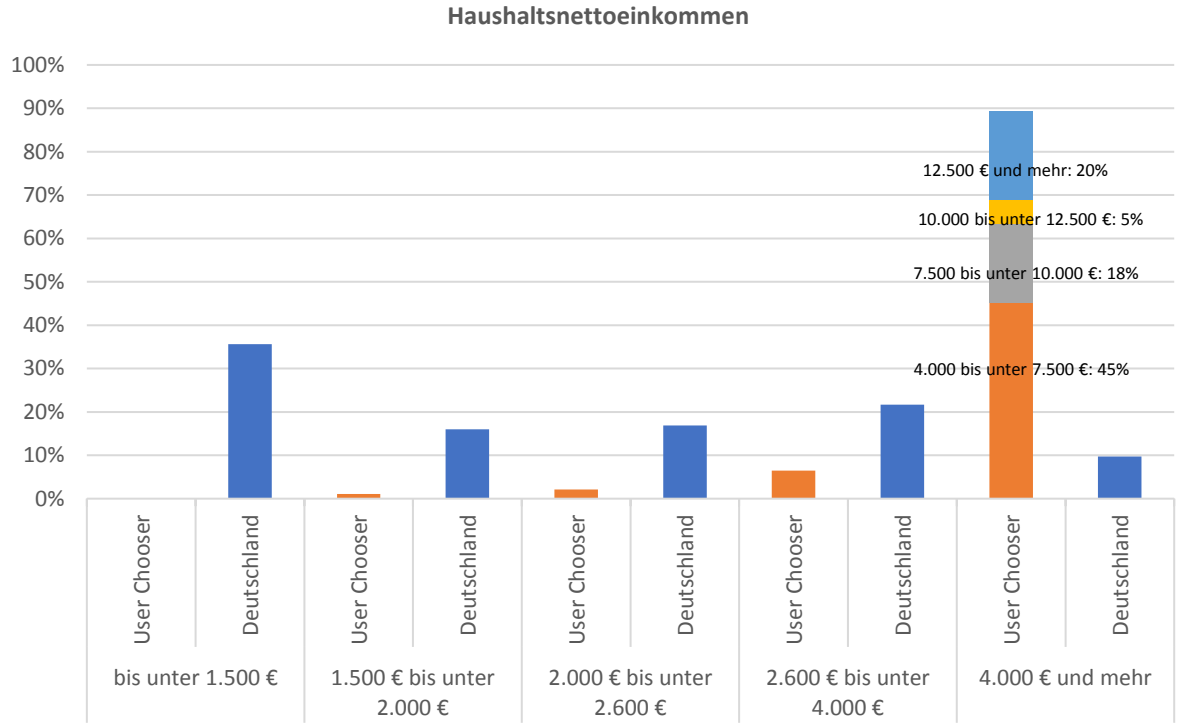


Abbildung 47: Nettohaushaltseinkommen, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = 105$.

Die befragten User Chooser stammen überwiegend aus sehr wohlhabenden Haushalten. Das durchschnittliche monatliche Nettoeinkommen der User Chooser-Haushalte beträgt 7.636€ (Indexwert: 242%). Das durchschnittliche monatliche Nettoeinkommen der Haushalte in Deutschland lag im Jahr 2015 dagegen bei 3.132 € (Indexwert: 100%). Das User Chooser-Haushaltsnettoeinkommen ist also im Durchschnitt mehr als doppelt so hoch. Während nur 10% der Haushalte in Deutschland monatlich 4.000 € oder mehr zur Verfügung haben, sind bei den befragten User Choosern 90%, 20% geben an im eigenen Haushalt sogar über mehr als 12.500 € im Monat verfügen zu können.

Innovationen einer Branche werden nicht von allen Nutzern gleich schnell adoptiert. Die Forschung hat deshalb das Konzept der persönlichen Innovativeness (deutsch: Innovativität) entwickelt. Je höher die

persönliche Innovativeness eines Menschen, desto schneller werden Innovationen für den eigenen Alltagsgebrauch adoptiert.[17] 61% der befragten User Chooser geben an, dass ihre Autos schon in der Vergangenheit tendenziell über mehr Innovationen verfügten als diejenigen ihrer Kollegen und Bekannten. Jeder Fünfte (20%) stimmt der zugehörigen Aussage voll und ganz zu. Ein weiterer Hinweis darauf, dass es sich bei den befragten User Choosern vielfach um typische „Early Adopter" handelt,[18] ist folgender: 29% stimmen der Aussage voll und ganz zu, dass sie es mögen Innovationen der Autobranche vor anderen Leuten zu nutzen, weitere 25% stimmen der Aussage überwiegend zu, 21% stimmen der zugehörigen Aussage eher zu (Summe: 75%). Sie mögen es also zur „Avantgarde" zu gehören. Typische „Early Adopter" wissen mehr über die jeweiligen Innovationen als ihr soziales Umfeld. Das zeigt sich auch bei der Betrachtung der Selbsteinschätzung des eigenen Wissens zum Thema Elektromobilität bei den befragten User Choosern. „Ich weiß mehr über die Elektromobilität als meine Arbeitskollegen und andere Menschen in meinem Umfeld." 50% stimmen dieser Aussage uneingeschränkt zu. Ein weiteres Drittel (34%) stimmt überwiegend zu. Jeder zehnte (10%) befragte User Chooser stimmt der Aussage „Ich würde mich auf dem Gebiet der Elektromobilität als Experte bezeichnen." voll und ganz zu, weitere 23% stimmen hier überwiegend zu.

Elektroautos gelten als sehr umweltfreundlich. Daher war zu vermuten, dass die Entscheidung für ein Elektroauto als eigenen Dienstwagen auch aus dem Umweltbewusstsein der befragten User Chooser motiviert wurde. Die Ergebnisse zum Umweltbewusstsein stützen diese Vermutung. Beinahe alle befragten User Chooser (97%) bezeichnen sich selbst als umweltbewusste Menschen. Es ist aber Vorsicht geboten, denn soziale Erwünschtheit beeinflusst das Antwortverhalten beim Thema Umweltbewusstsein in der Regel besonders stark.

Überraschenderweise hat jeder fünfte befragte User Chooser (20%) sein Elektroauto ohne jede Fahrerfahrung mit Elektroautos bestellt. Noch nicht einmal Probefahrten, Testfahrten oder Ähnliches wurden im Vorfeld unternommen. Einige wenige Teilnehmer waren schon zur Erstbefragung (t_0) „alte Hasen": 5 User Chooser hatten schon mehr als 30.000 km mit Elektroautos zurückgelegt, einer sogar mehr als 140.000 km. Dagegen hatten 15% weniger als 50 km Fahrerfahrung vor Erhalt ihres Projektfahrzeugs sammeln können, weitere 31% nicht mehr als 250 km. Das deutet auf eine Probefahrt bzw. einen oder zwei Probefahrtentage im Vorfeld der Anschaffungsentscheidung hin.

Bei 94% der User Chooser Haushalte ist noch mindestens ein weiteres Fahrzeug neben dem Projektelektroauto vorhanden. Sind mehrere Pkw im Privathaushalt vorhanden, ist das Elektroauto in 50% der Fälle der private Erstwagen – also der Pkw, mit dem auch im Privathaushalt die meisten Fahrten getätigt werden. Zwei von drei befragten User Choosern (68%) hätten ihr Elektroauto nicht angeschafft, wenn nicht mindestens ein weiterer Pkw im Privathaushalt zur Verfügung gestanden hätte. Neben den typischen

[17] Zum Konzept der Innovativeness genauer: Vgl. Rogers (2003).

[18] Zum Konzept der Early Adopter genauer: ebenda.

elektromobilitätsspezifischen Nachteilen (Reichweite, Ladedauer, Infrastruktur), ist dies nach Angaben der Teilnehmer auch auf fehlende Ausstattungsoptionen (bspw. Anhängerkupplung für Fahrradträger) und dem eingeschränkten Platzangebot verfügbarer Elektroauto-Modelle zurückzuführen.

Oftmals erhalten Dienstwagenfahrer noch weitere fahrzeugbezogene Leistungen zusätzlich zum persönlichen Dienstwagen. Abbildung 48 zeigt die Zusatzleistungen präsentiert, die die befragten User Chooser zusätzlich ihrem Projektfahrzeug erhalten.

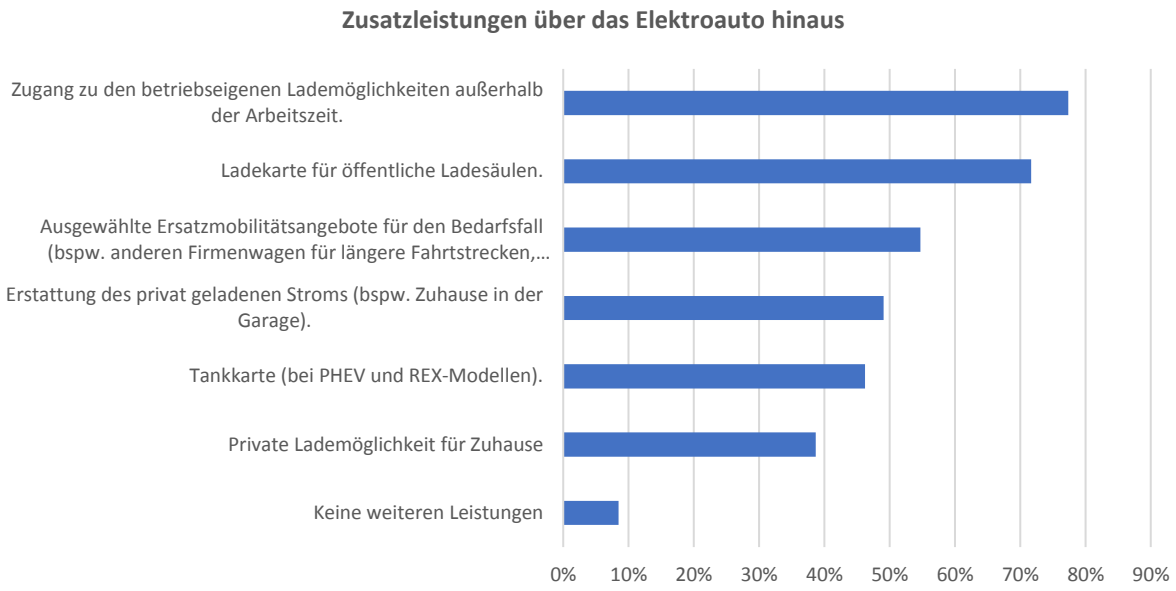


Abbildung 48: Zusatzleistungen über das Elektroauto hinaus, Befragungszeitpunkt: t_0; $n_{UC}(t_0) = 106$.

72% der befragten User Chooser geben an, von ihrer Firma eine Ladekarte für öffentliche Ladesäulen erhalten haben. 55% stehen im Bedarfsfall Ersatzmobilitätsangebote zur Verfügung. Nur 49% verfügten zu Beginn der Nutzung über eine Möglichkeit, den privat geladenen Strom voll abzurechnen. Die andere Hälfte zahlte mindestens einen Anteil der Stromkosten aus der eigenen Tasche. Immerhin 39% wurde zusätzlich zum Elektroauto eine Lademöglichkeit für das private Laden zu Hause durch den eigenen Betrieb finanziert. User Chooser, die einen BMW i3 mit Range Extender besitzen, erhalten zusätzlich zu ihrem Elektroauto in der Regel noch eine Tankkarte.

Diejenigen User Chooser, die nach eigenen Angaben keine unselbständig Beschäftigten sind (bspw. Eigentümer, geschäftsführende Gesellschafter), wurden zusätzlich gebeten die Branche ihres Betriebs zu nennen. Besonders markant ist der hohe Anteil von Betrieben in der Stichprobe, die zur Branche „Erbringung von freiberuflichen, wissenschaftlichen und technischen Dienstleistungen“ gehören (35%). Viele der selbständigen User Chooser üben demnach typische Katalogberufe aus (Berater, Rechtsanwälte u.a.). Ansonsten bildet die User Chooser-Stichprobe die Grundgesamtheit in Deutschland hinsichtlich der Branchenverteilung nach Betriebsanzahl vielfach ausreichend nach. In der User Chooser-Stichprobe dominieren Kleinst- (47%) und Kleinunternehmen (36%) mit weniger als 50 Mitarbeitern. Größere Betriebe wurden

überwiegend in der Fuhrparkleiter-Stichprobe erfasst. Die Mehrheit der User Chooser-Betriebe hat folgerichtig auch nur bis zu 9 Poolnutzer (69%), jeder fünfte Betrieb hat 10 bis 49 Poolnutzer (20%), weitere 9% 50 bis 249 Poolnutzer und nur 2% der Betriebe hat mehr als 250 Poolnutzer.

Ziele und Motive

Die von den befragten User Choosern genannten Nutzungsmotive sind breitgefächert. Am häufigsten werden Umweltschutz (48%), Neugier auf Innovationen (45%) und die Überzeugung einen Antrieb der Zukunft zu fahren (42%) genannt. Wiederum zeigt sich eine hohe Innovationsaffinität der befragten Gruppe von Auskunftspersonen. Neben der Neugier auf Innovationen, zählt mehr als ein Drittel (35%) die Unterstützung neuer Technologien zu den 3 wichtigsten Motiven der Elektroauto-Nutzung. Immerhin jeder fünfte User Chooser (20%) nennt mit einem „schöneren Fahrerlebnis“ auch ein hedonistisches Nutzungsmotiv unter den 3 wichtigsten Motiven. Abbildung 49 zeigt nochmals eine Übersicht über die Motive.

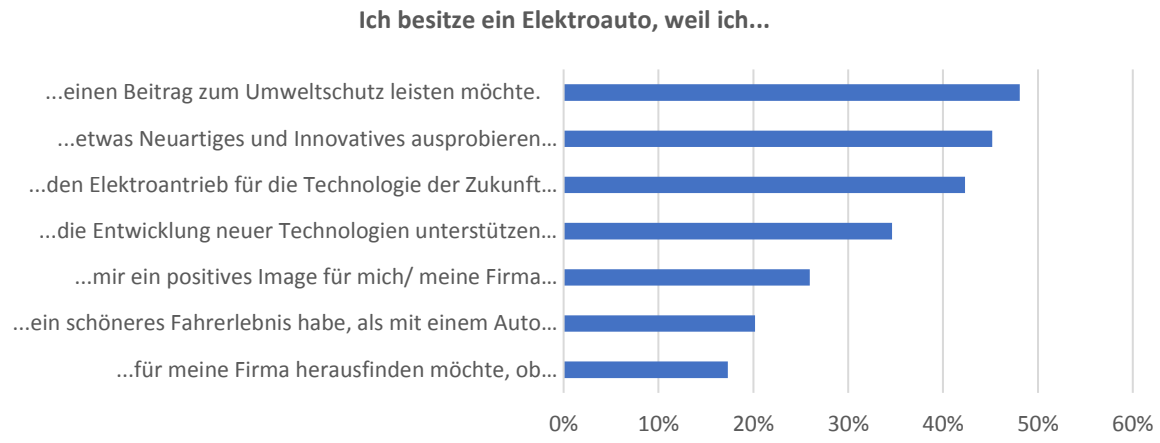


Abbildung 49: Motiv zum Besitz eines Elektroautos, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = 104$.

Etwa jeder 7. befragte User Chooser zählt auch Aspekte wie „Eignung des Elektroautos zum Geschäftsmodell der eigenen Firma“ (16%), „Technikinteresse“ (15%) und „Unabhängigkeit von Erdöl“ (14%) zu den 3 wichtigsten persönlichen Motiven, sich für ein Elektroauto als Dienstwagen zu entscheiden. Insgesamt gilt: Die wichtigsten Motive sich gegen ein Verbrenner- und für ein Elektro-Modell als Dienstwagen zu entscheiden, sind zum einen der Umweltschutzgedanke und zum anderen die Neuartigkeit der Antriebstechnologie.

Neben Umweltschutzaspekten verbinden fast alle befragten User Chooser auch Spaß mit der Nutzung des Elektroautos. So stimmen 80% der Aussage „Die Nutzung meines Elektroautos macht Spaß“ uneingeschränkt zu. Elektroautos sprechen die befragten User Chooser offensichtlich auch in hohem Maße auf der emotionalen Ebene an. Das Elektroauto ermöglicht den Teilnehmern eine Form von individueller Mobilität, die Vernunft (Umweltschutz) mit Spaß an neuartiger Hochtechnologie und „Freude am Fahren“ vereint.

Beschaffung

Nicht immer können dienstwagenberechtigte Mitarbeiter ihren Dienstwagen völlig frei wählen. Abbildung 50 zeigt den „Freedom of Choice“ der User Chooser in der Stichprobe.

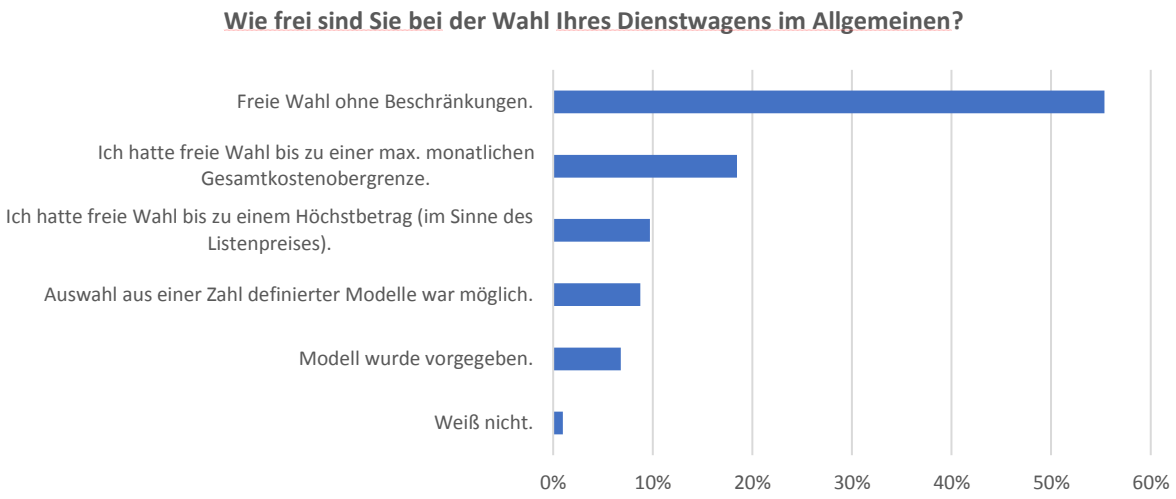


Abbildung 50: Freedom of Choice, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = 103$.

Die Mehrheit der befragten User Chooser (55%) gibt an bei der Wahl des persönlichen Dienstwagens völlig frei zu sein. Dies ist auf den hohen Anteil (64%) von Eigentümern, Freiberuflern und geschäftsführenden Gesellschaftern in der Stichprobe zurückzuführen. Während 9% ihr Elektroauto aus einer Dienstwagen-Modellliste auswählen dürfen, war bei 7% der Teilnehmer auch das Modell vorgegeben.

Für die Hälfte der befragten User Chooser war von vornherein klar, dass sie keinen konventionellen Dienstwagen mit Benzin- oder Dieselmotor mehr haben möchten: Nur 47% geben an, dass sie reine Verbrenner-Modelle in ihre Anschaffungsüberlegung einbezogen hatten. 87% haben das reine Elektroauto in ihre Anschaffungsüberlegung einbezogen, 55% haben sich schließlich auch dafür entschieden. Ebenfalls 87% haben mit Range Extender-Modellen (58%) und Plug-in-Hybriden (29%) Elektroautos mit Verbrenner-Unterstützung in ihre Anschaffungsüberlegung einbezogen. Letztlich haben sich 45% für diese beiden Antriebsarten entschieden. Hätte das letztlich gewählte elektrische Antriebskonzept nicht zur Verfügung gestanden, wären die meisten Teilnehmer (42%) zum konventionellen Diesel- oder Benzin-Dienstwagen zurückgekehrt. 15% nennen ein BEV- und 13% ein PHEV-Modell als zweite Wahl. Beinahe jeder Fünfte (18%) hätte auf eine Neuanschaffung ganz verzichtet, wenn sein Antriebskonzept nicht verfügbar gewesen wäre. Es wurden durch die Projektautos überwiegend Diesel- (71%) und Benzin-Modelle (23%) ersetzt, wobei es mehrheitlich (80%) um die alten Dienstwagen der befragten User Chooser handelte.

In Abbildung 51 werden die wichtigsten Kaufkriterien der Projektfahrzeuge aufgelistet.

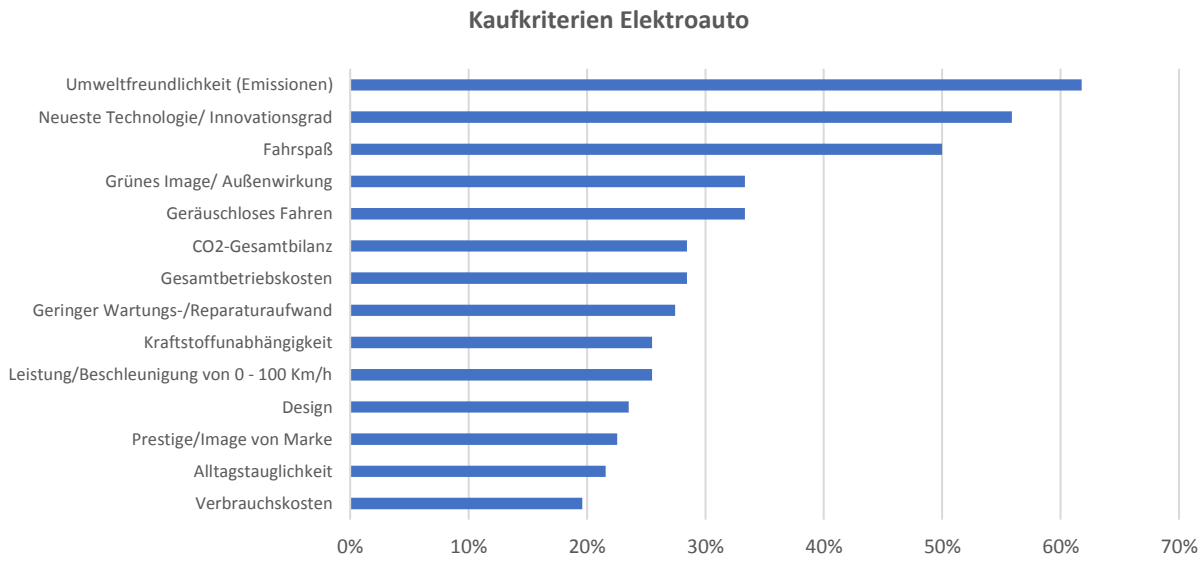


Abbildung 51: Kaufkriterien Elektroauto, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = 103$.

Fragt man die Teilnehmer nach ihren drei wichtigsten Anschaffungskriterien ihres Projektfahrzeugs, so nennen diese eine Vielzahl verschiedener Aspekte. Erstaunlicherweise ist die Reichweite nur selten (bei 8%) unter den drei wichtigsten Kriterien vertreten. Unter den TOP3-Kaufkriterien wurde die Umweltfreundlichkeit (62%) am häufigsten genannt, dahinter folgen die Aspekte „Neueste Technologie/Innovationsgrad (56%) und der Fahrspaß (50%). Damit werden sowohl rationale als auch emotionale Anschaffungskriterien am häufigsten von den befragten User Choosern genannt.

Nutzungsprofil

Abbildung 52 zeigt, welche Variablen des persönlichen Nutzungsprofils von den befragten User Choosern vor der Anschaffung herangezogen wurden, um die Eignung des Elektrofahrzeugs für ihre Ansprüche zu überprüfen.

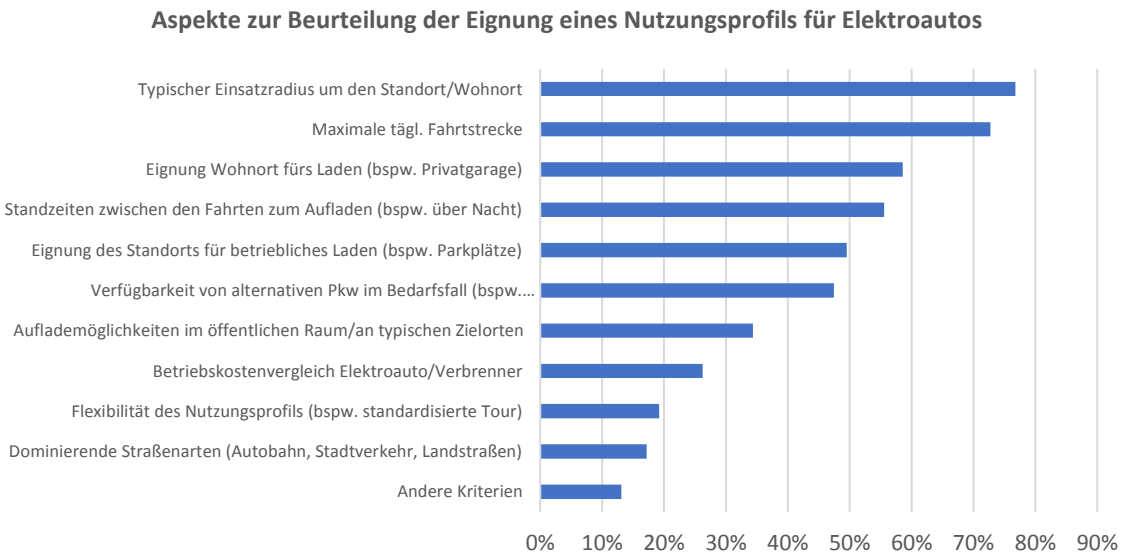


Abbildung 52: Aspekte zur Beurteilung der Eignung, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = 103$.

99 von 103 befragten User Choosern geben an, sich im Vorfeld der Elektroauto-Anschaffung Gedanken gemacht, ob, und wenn ja inwieweit, sich ihr persönliches Nutzungsprofil und ihr Umfeld für Elektroautos eignen. In den Entscheidungsprozess zur Anschaffung ihres Elektroautos haben die befragten User Chooser am häufigsten den typischen Einsatzradius um Firma und Wohnort (77%), sowie die maximale tägliche Fahrtstrecke (72%) einbezogen. Es wird also vorwiegend über Streckenlängen beurteilt, ob ein Elektroauto als Dienstwagen infrage kommt. Daneben waren auch die Umsetzbarkeit von Ladeinfrastruktur zu Hause (59%) und im Betrieb (50%) häufig Teil der Überlegungen.

In den 7 bis 9 Monaten zwischen Erst- (t_0) und Zweitbefragung (t_1) hat jeder befragte User Chooser im Durchschnitt 7.784 km mit seinem Elektroauto zurückgelegt, wie der durchschnittliche Erfahrungsstand mit dem Elektroauto im Vergleich zeigt: t_0: 3.694 km; t_1: 11.478 km. Zwischen den beiden Befragungsrunden sind die befragten User Chooser mit ihren Elektroautos regelmäßig gefahren, wie auch die Angaben zur Nutzungshäufigkeit verdeutlichen: 62% nutzen ihr Elektroauto mindestens einmal am Tag. Nur ein einziger Teilnehmer hat sein Elektroauto seit der Erstbefragung nicht mehr genutzt. Der Grund dafür waren Sicherheitsbedenken wegen technischer Probleme. Die befragten User Chooser können uneingeschränkt als Hauptnutzer gelten: 28% geben an, der alleinige Fahrer des Elektroautos zu sein, weitere 39% sitzen nach eigenen Angaben bei mindestens 9 von 10 Fahrten selbst am Steuer, während nur 13% dies bei weniger als 7 von 10 Fahrten ihres Elektroautos tun.

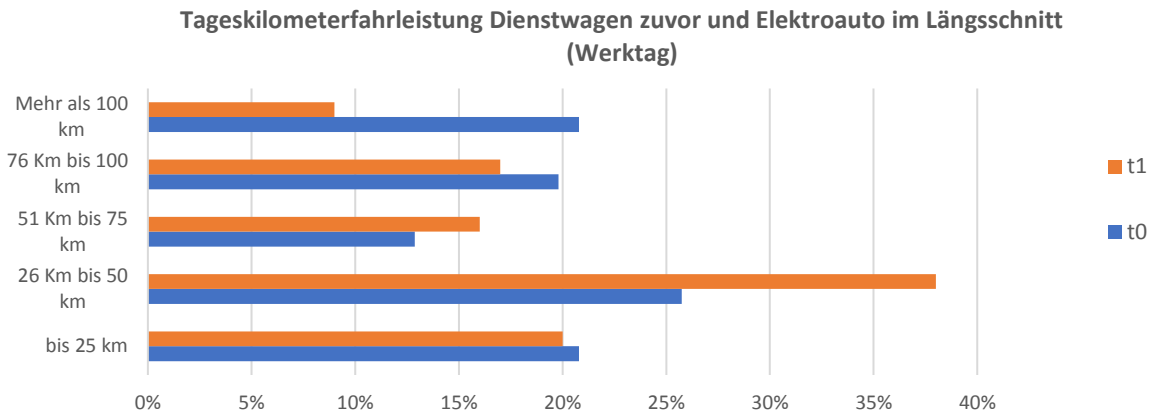


Abbildung 53: Tageskilometerfahrleistung im Längsschnitt (Werktag), Befragungszeitpunkt: t_0/t_1; $n_{UC} = 100$.

Die durchschnittliche Tagesfahrleistung hat nach der Übernahme des Elektroautos im Vergleich mit dem vorherigen Dienstwagen statistisch signifikant abgenommen (p-Wert: 0,005), wie Abbildung 53 zeigt. Bei den vorherigen Dienstwagen handelte es sich überwiegend um konventionelle Diesel- und Benzin-Modelle (94%). Vermutlich wird für längere Fahrtstrecken auf alternative Verkehrsmittel zurückgegriffen, da sich der Mobilitätsbedarf in wenigen Monaten kaum verändert haben dürfte. Zwischen 40% und 60% der Teilnehmer geben an, schon vor dem Elektroauto regelmäßig auch Bahn, andere Firmen-Pkw, Mietwagen und Flugzeuge für Dienstreisen genutzt zu haben.

Auch ein Blick auf die daraus resultierenden Jahreskilometerfahrleistungen ist interessant und wird in Abbildung 54 präsentiert.

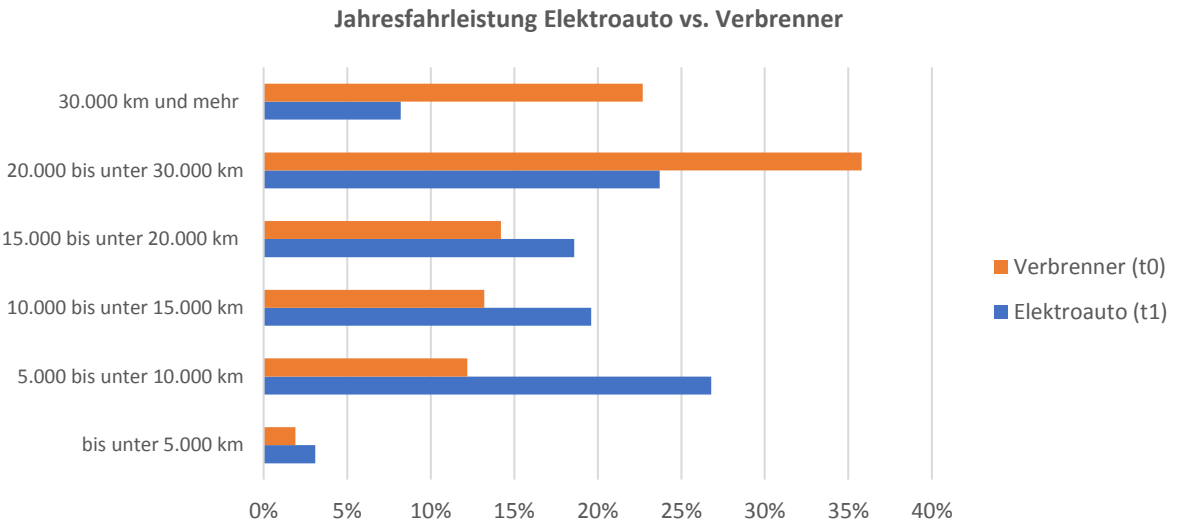


Abbildung 54: Jahresfahrleistung Elektroauto vs. Verbrenner, Befragungszeitpunkt: t_0/t_1; $n_{UC}(t_1) = 100$.

Die Jahreskilometerfahrleistung mit dem persönlichen Dienstwagen hat sich mit der Übernahme des Elektroautos deutlich verringert. Der fiktive Anteil von Vielfahrern mit mehr als 30.000 km p.a. ging von 23% mit Verbrenner-Modellen auf 8% mit der Nutzung der Elektroautos zurück. Es ist nicht davon auszugehen, dass sich das Nutzungsprofil bei vielen Teilnehmern mit der Übernahme des Elektroautos massiv verändert hat. Daher kommt die Nutzung alternativer Verkehrsmittel (andere Firmen-Pkw, Flugzeuge, Bahn) in Betracht, wenn es um die Suche nach den „verlorenen" Kilometer geht.

Schaut man sich den Vergleich zwischen BMW i3 BEV und REX Fahrern hinsichtlich der üblicherweise gefahrenen Streckenlänge an erhält man das in Abbildung 55 dargestellte Ergebnis.

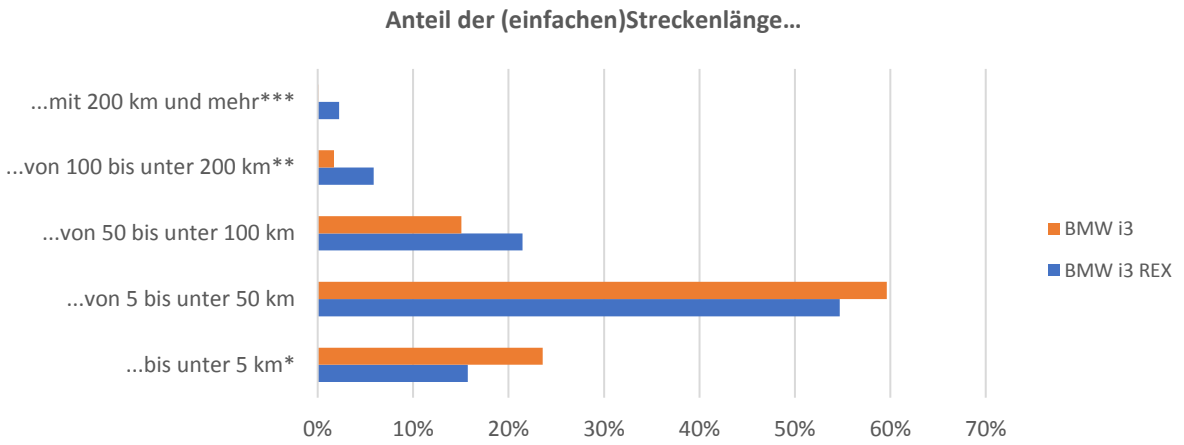


Abbildung 55: Gruppenvergleich: Anteil der (einfachen) Streckenlänge, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = 104$. *Mann-Whitney-U p-Wert: 0,043 / **p-Wert: 0,025 / ***p-Wert: 0,001

Betrachtet man einmal die durchschnittlichen Anteile verschiedener Streckenlängen von BMW i3 BEV- und REX-User Choosern getrennt voneinander, so wird deutlich, dass bei der Range Extender-Version etwa 8% der jährlich zurückgelegten (einfachen) Streckenlängen länger als 100 km sind. Beim BEV-Modell sind es nur knapp 2%. Wie erwartet werden Fahrten mit einfachen Streckenlängen über 100 km mit dem reinelektrischen BMW i3 beinahe vollständig gemieden. Auch der BMW i3 REX wird nur selten für solche Streckenlängen genutzt, allerdings signifikant häufiger. Dies wurde mit dem Mann-Whitney-U Test überprüft.[19] Ein verbauter Range Extender führt demnach tatsächlich zu einem signifikant höheren Anteil größerer Streckenlängen – wenn auch auf niedrigem Niveau.

[19] Zur Anwendung des Mann-Whitney U Tests: Vgl. Sachs (2013), S. 230f

Vor- und Nachteile

Aus Sicht der User Chooser haben Elektroautos die in Abbildung 56 genannten Vorteile.

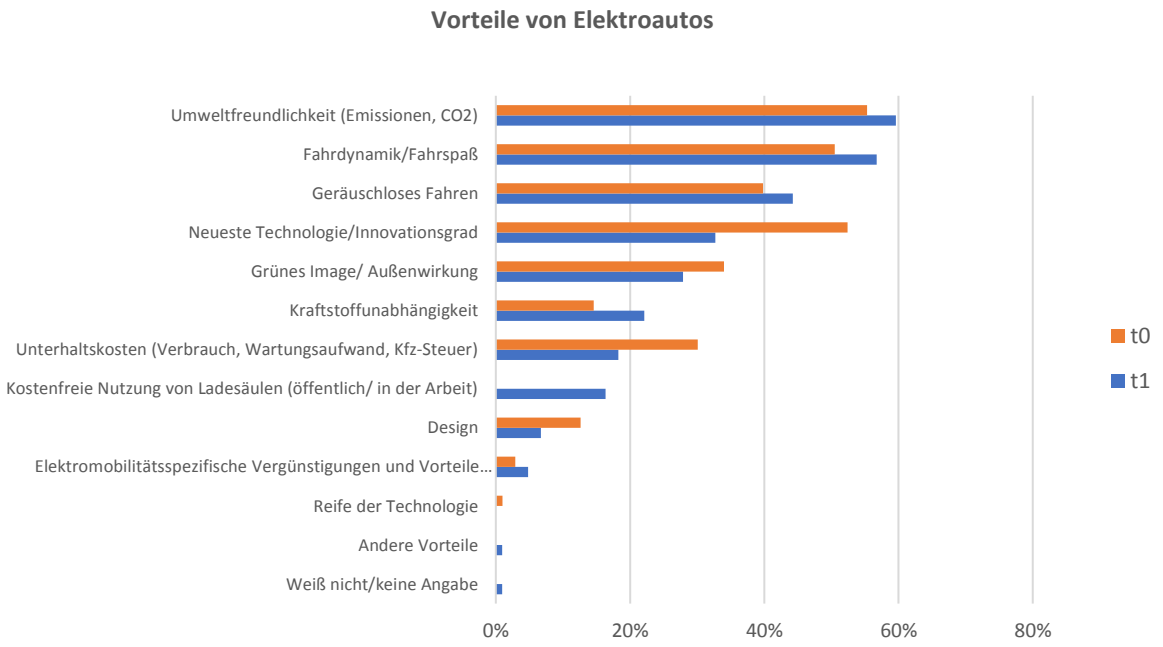


Abbildung 56: Vorteile von Elektroautos, Befragungszeitpunkt: t_0/t_1, $n_{UC} = 105$.

Unter den drei wichtigsten Vorteilen von Elektroautos werden von den befragten User Choosern am häufigsten Umweltfreundlichkeit (60%), Fahrspaß/Fahrdynamik (57%) und geräuschloses Fahren (44%) genannt. Die Wichtigkeit des Vorteils Neuste Technologie/Innovationsgrad nimmt im Zeitablauf deutlich ab (t_0: 52%; t_1: 33%), auch der Aspekt Unterhaltskosten wird nach 7-9-monatiger Nutzung deutlich seltener zu den wichtigsten drei Vorteilen des eigenen Elektroautos gezählt (t_0: 30%; t_1: 18%). Das Fahren eines Elektroautos gibt den meisten befragten User Choosern (93%) ein gutes Gewissen. Trotzdem geben die Teilnehmer ein eher differenziertes Urteil zur Umwelt-Gesamtbilanz von der Produktion bis zur Verwertung ab. Für immerhin 33% sind Elektroautos bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus nicht umweltfreundlicher als konventionelle Verbrennerfahrzeuge.

Mehr als jeder vierte befragte User Chooser (28%) nennt Image/Außenwirkung als einen der drei wichtigsten Vorteile seines Elektroautos. Fast alle Teilnehmer geben an, dass sie während der 7 bis 9-monatigen Nutzung von Kunden oder Geschäftspartnern auf das Elektroauto angesprochen wurden. Folgerichtig sind 90% der befragten User Chooser der Meinung, dass ihr Elektroauto das Ansehen der Firma positiv beeinflusst. Das Design spielt für die befragten User Chooser nur eine untergeordnete Rolle. Lediglich 7% geben das Design als einen der wichtigsten drei Vorteile ihres Elektroautos an. Der häufiger genannte Vorteil Image/Außenwirkung scheint jedoch auch die Designwünsche zu beeinflussen. Für 7 von 10 befragten User Choosern (69%) ist es eher wichtig, dass sich ihr Elektroauto sichtbar von konventionellen Modellen unterscheidet. 28% stimmen der Aussage uneingeschränkt zu, weitere 25% weitgehend.

Nach der Betrachtung der Vorteile werden nun in Abbildung 57 die Nachteile des Elektroautos aus Sicht der User Chooser beleuchtet.

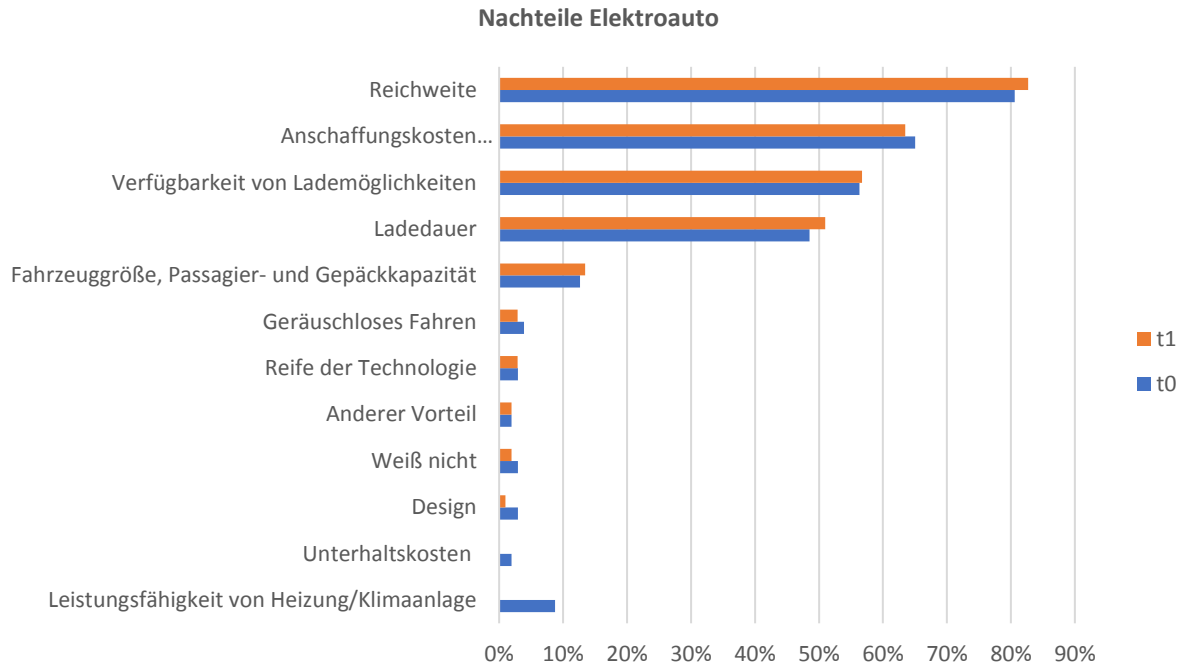


Abbildung 57: Nachteile Elektroauto, Befragungszeitpunkt: t_0/t_1; $n_{UC}(t_1) = 104$.

Die Ergebnisse zeigen eine Konzentration der wahrgenommenen Nachteile auf 4 alte Bekannte: Reichweite (83%), Anschaffungskosten (64%), Verfügbarkeit von Lademöglichkeiten (57%) und Ladedauer (51%). Das Ranking der Nachteile durch die befragten User Chooser ergibt das gleiche Bild. Die Reichweite wird am häufigsten an die erste Stelle der Nachteile gesetzt (53 mal), die Anschaffungskosten am zweithäufigsten (25 mal). Nach 7 bis 9-monatiger Nutzung gibt es nur wenige Änderungen, ausgenommen das Thema Leistungsfähigkeit von Heizung/Klimaanlage. Unter den drei wichtigsten Nachteilen wird der Aspekt von keinem der befragten 104 User Chooser in t_1 mehr genannt.

Zwischen der Erst- und der Zweitbefragung (7 bis 9 Monate später) sind keine statistisch signifikanten Änderungen im Reichweiten-Urteil feststellbar. Der Aussage „Die Reichweite ist ausreichend für meinen Arbeitsalltag“ stimmen 33% vor dem Hintergrund ihres Nutzungsprofils völlig zu, weitere 40% weitgehend und 9% eher (Summe: 82%). Die überwiegend fahrtstreckenbezogene Analyse des eigenen Nutzungsprofils vor der Elektroauto-Anschaffung wirkt sich offensichtlich später in der realen Nutzung positiv aus. Der Aussage „Ich fühle mich durch die Reichweite in meinem Aktionsradius eingeschränkt.“ stimmen 7% uneingeschränkt zu, immerhin stimmen 18% weitgehend und 26% eher zu. Allerdings ist zu beachten, dass sich damit etwa die Hälfte der Auskunftsgruppe (48%) im eigenen Aktionsradius eher nicht, weitgehend nicht oder gar nicht eingeschränkt fühlt. Wegen der Reichweite oftmals besorgt sind tendenziell 24%. Etwa die Hälfte (49%) lehnt die zugehörige Aussage dagegen völlig oder weitgehend ab.

Zufriedenheit

Abbildung 58 zeigt die globale Zufriedenheit der User Chooser, unterteilt in die jeweiligen Fahrzeug-Modelle:

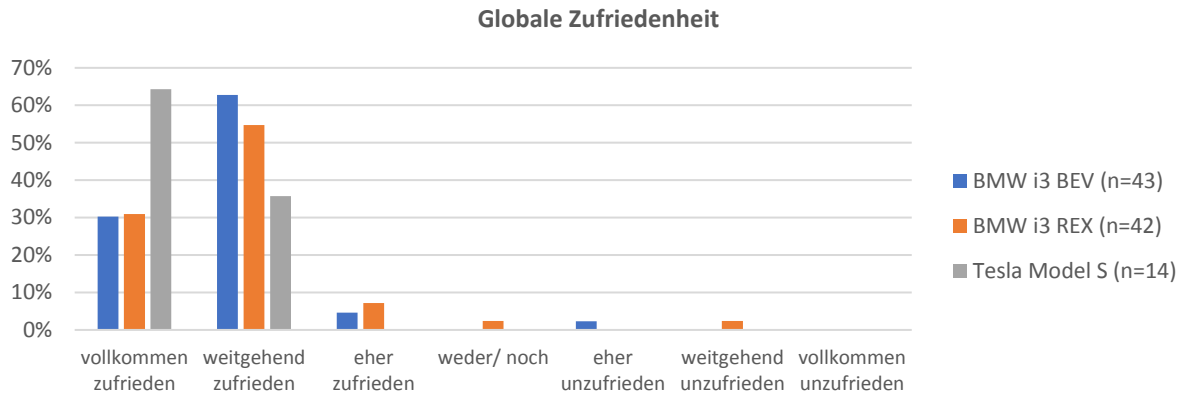


Abbildung 58: Globale Zufriedenheit, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = n$.

Die befragten User Chooser eines Tesla Model S sind signifikant zufriedener mit ihrem Elektroauto als die Fahrer eines reinelektrischen BMW i3 oder eines BMW i3 REX. Vergleicht man die globale Zufriedenheit von BMW i3- und BMW i3 REX-User Choosern mit ihren Modellen untereinander, ist dagegen kein statistisch signifikanter Unterschied feststellbar.

Obwohl die Leasingraten eines Tesla Model S im Durchschnitt deutlich über denjenigen eines BMW i3 liegen, sind die befragten Tesla-User Chooser mit der Kostenbilanz ihres Modells signifikant zufriedener. Vermutlich beeinflusst hier das kostenfreie Schnellladen an den Tesla-Super Chargern das Urteil stark. Die bessere Bewertung der Kostenbilanz des Teslas deutet ferner daraufhin, dass sich Elektroautos einem Kostenvergleich mit den Verbrenner-Modellen des jeweiligen Fahrzeugsegments stellen müssen. Bei der Material- und Verarbeitungsqualität schneidet der BMW i3 im Urteil der User Chooser hingegen deutlich besser ab als der Tesla.

Zwar sind 81% der befragten User Chooser mit der Alltagstauglichkeit ihrer Elektroautos weitgehend bzw. vollkommen zufrieden, die Reichweite ihrer Elektroautos hingegen beurteilen die Teilnehmer deutlich kritischer: 4% sind mit der gebotenen Reichweite vollkommen unzufrieden, 12,5% sind weitgehend und 31% eher unzufrieden (Summe: 47,5%). Etwa 20% sind mit der gebotenen Reichweite vollkommen (2%) oder weitgehend (18%) zufrieden. Tesla-Besitzer sind im Vergleich mit BMW i3-User Chooser signifikant zufriedener mit der gebotenen Reichweite ihres Modells. Auffällig ist, dass 35% der BMW i3-User Chooser mit der Reichweite eher unzufrieden sind. Zwischen dem reinelektrischen BMW i3 und dem BMW i3 REX gibt es keine signifikanten Unterschiede. Befragt man die Tesla- und BMW i3-User Chooser nach ihrer Zufriedenheit mit der Alltagstauglichkeit ihrer Modelle, sind auch hier signifikant höhere Zufriedenheitswerte in der Tesla-Gruppe feststellbar. Dies dürfte eng mit den Aspekten Ladehäufigkeit bzw. Ladeinfrastruktur und Reichweite verbunden sein. Allerdings sollte der Aspekt Fahrzeuggröße (Platzangebot und

Kofferraumvolumen) nicht ausgeklammert werden: Immerhin 20% der BMW i3-User Chooser geben an, durch die Fahrzeuggröße weniger Fahrten mit ihrem Modell erfüllen zu können als gewünscht.

Zuletzt ist zu erwähnen, dass 10 von 104 befragten User Choosern ihr Elektroauto sicher oder möglicherweise vor dem planmäßigen Leasingende abgeben werden. Drei Teilnehmer können oder wollen keine Angabe dazu machen. Als Gründe für die sichere oder mögliche vorzeitige Abgabe werden Reichweitenprobleme (3 mal) und eine Neuanschaffung (3 mal) am häufigsten genannt. Nur 2 von 104 befragten User Choosern hatten das Elektroauto zum Zeitpunkt ihrer Zweitbefragung nicht mehr in ihrem Besitz. Die beiden Teilnehmer nennen die Kostenbilanz und Reichweitenprobleme als Gründe der vorzeitigen Abgabe.

Mobilitätsurteil

Etwa 90% der befragten User Chooser sehen ihre täglichen Mobilitätsanforderungen durch ihr Elektroauto erfüllt. Darunter geben 45% an, dass dies weitgehend der Fall ist, 33% stimmen der entsprechenden Aussage sogar uneingeschränkt zu. Nur 2 von 104 befragten User Choosern sehen ihre täglichen Mobilitätsanforderungen durch das Elektroauto überhaupt nicht erfüllt, bei weiteren 7 Teilnehmern ist dies ebenfalls eher oder weitgehend nicht der Fall. Problematisch wird es vor allem bei Fahrten außerhalb der maximalen Reichweite. Der Aussage „Mit dem Elektroauto sind Fahrten außerhalb der maximalen Reichweite umständlich." stimmen 40% völlig zu, weitere 32% stimmen der Aussage weitgehend zu (Summe: 72%).

Abbildung 59 wird im Längsschnitt die Veränderung des Flexibilitätsurteils dargestellt.

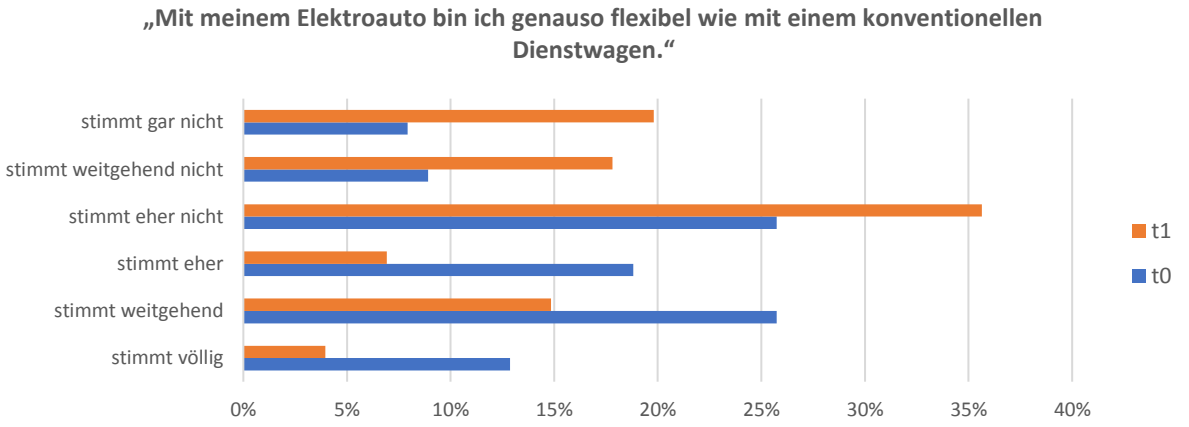


Abbildung 59: Flexibilitätsurteil im Längsschnitt, Befragungszeitpunkt: t_0/t_1; $n_{UC} = 101$.

Den wichtigsten Nachteil der Elektroautos stellt deren eingeschränkte Flexibilität dar. Dies ist insofern besonders relevant, als dass das Auto sonst gegenüber anderen Verkehrsmitteln als besonders flexibel einzuschätzen ist. 20% stimmen der Aussage „Mit meinem Elektroauto bin ich genauso flexibel wie mit einem konventionellen Dienstwagen." gar nicht zu, 18% überwiegend nicht und 36% eher nicht (Summe: 74%). Nur 4% der befragten User Chooser geben an, mit der Flexibilität ihres Elektroautos voll und ganz zufrieden zu sein. Das Flexibilitätsurteil wird dabei mit zunehmender Fahrerfahrung signifikant kritischer

(p-Wert: 0,000). Hier muss von enttäuschten Erwartungen nach 7 bis 9-monatiger Nutzung ausgegangen werden. Als effektivste Maßnahme zur Erhöhung der Flexibilität sieht eine relative Mehrheit (48%) die Verwendung größerer Batterien, auch wenn die Ladezeiten dadurch zunehmen würden. 30% sehen dagegen im Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur die effektivste Maßnahme zur Verbesserung der Flexibilität.

Eng mit der Flexibilität verbunden ist die Frage für wie viele anstehende Fahrten man seinen Dienstwagen einsetzen kann. Abbildung 60 illustriert den prozentualen Anteil der Fahrten, die die User Chooser mit dem Elektroauto nach eigener Einschätzung abdecken können.

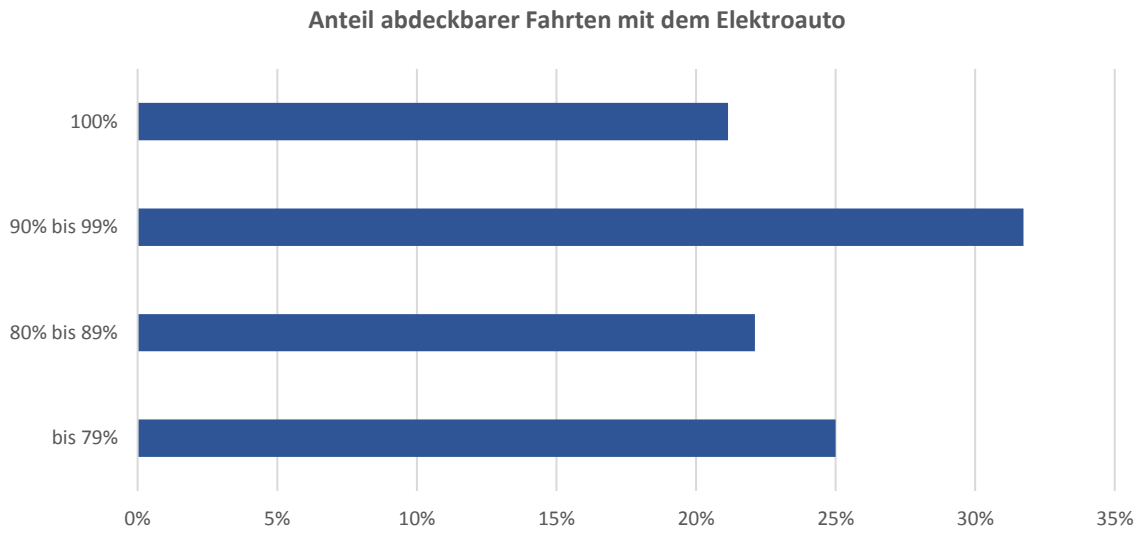


Abbildung 60: Anteil abdeckbarer Fahrten mit dem Elektroauto, Befragungzeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = 104$.

Der mit dem Elektroauto abdeckbare Fahrtenanteil liegt bei über der Hälfte der User Chooser bei 90% aller Fahrten oder mehr. Dies entspricht bei 83% der befragten User Chooser den Erwartungen von der ersten Nutzung des Fahrzeugs. 11% geben an vor der Nutzung erwartet zu haben, das Elektroauto für mehr Fahrten einsetzen zu können. Jeder Fünfte (21%) kann nach eigener Einschätzung alle seine Fahrten mit dem Elektroauto bewältigen. Im Umkehrschluss können 79% der befragten User Chooser mit dem eigenen Elektroauto nicht alle ihre Fahrten bewältigen, was 16 User Chooser (20%) nicht nur auf die eingeschränkte Reichweite und lange Ladestopps, sondern auch auf das Platzangebot der eigenen Elektroautos zurückführen. Die Abfrage der hypothetischen Fahrtenabdeckung ohne Platzproblem ergibt allerdings: Auch dann erhöht sich 100%-Fahrtenanteil nicht, wofür wiederum die Gründe der Nichtnutzung eine Erklärung liefern können. Denn haben die befragten User Chooser ihr Elektroauto einmal nicht für eine anstehende Fahrt genutzt, geschah dies überwiegend wegen einer zu geringen verfügbaren Reichweite (63%) oder wegen der Unvereinbarkeit von längeren Ladestopps mit dem eigenen Terminplan/Tagesablauf (25%). Eine eingeschränkte Gepäckraum-/Transportkapazität (21%) und Passagierkapazität

(16%) werden insgesamt von 37% der befragten User Chooser unter den Gründen der Nichtnutzung genannt.

Zum Thema Reichweiten wurde auch bei den User Choosern die van Westendorp Methode angewendet, um optimale Reichweiten zu ermitteln, mit dem in Abbildung 61 dargestellten Ergebnis.

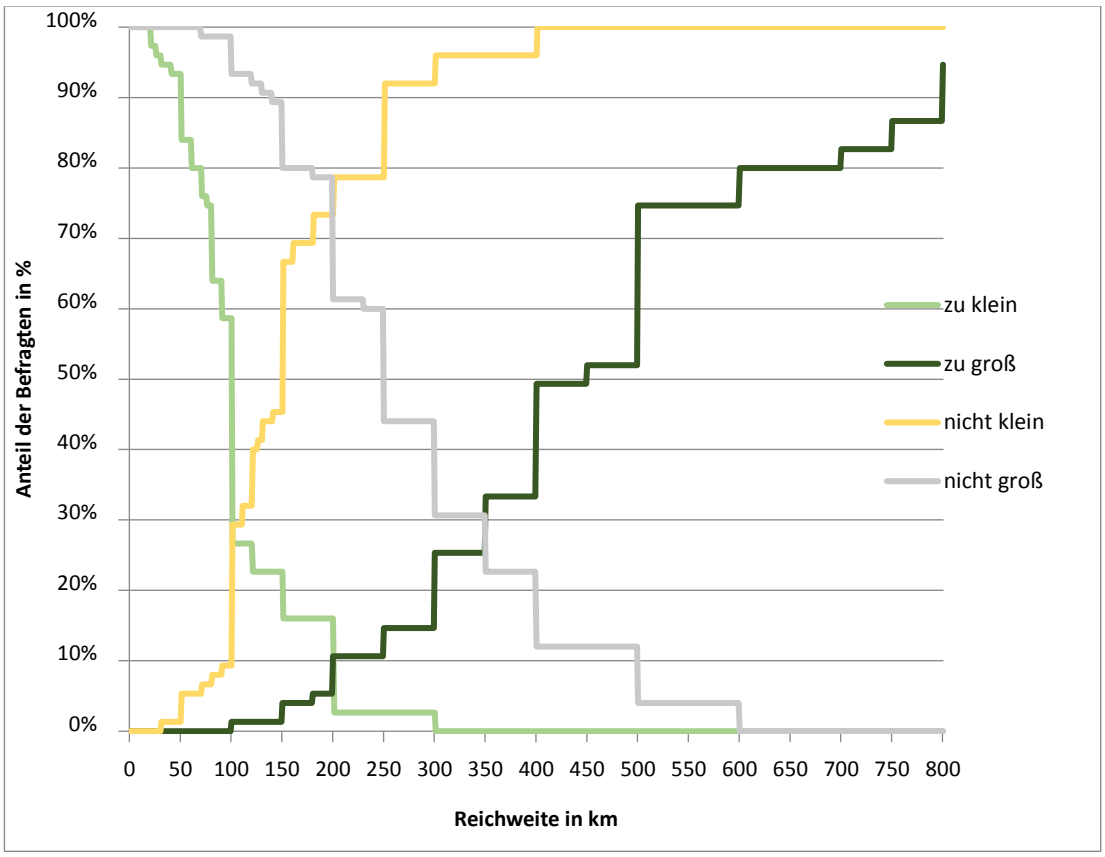


Abbildung 61: Van Westendorp Reichweiten User Chooser, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = 75$.

Die ermittelte optimale Reichweite für User Chooser beträgt 201 km. Den Rahmen für akzeptable Reichweiten bilden 101 km und 350 km.

Insgesamt 72% der befragten User Chooser geben an, dass es Fahrten gibt, die sie gerne mit ihrem Elektroauto erfüllen würden, es aber nicht können. Am häufigsten werden Strecken außerhalb der verfügbaren Reichweiten genannt (38 mal). Daneben werden auch private Fahrten genannt (21 mal). Vermutlich sind hier Wochenendausflüge und Urlaubsfahrten (Langstrecken mit höherem Platzbedarf) gemeint. Es sind vor allem Fahrten mit längeren Strecken, bei denen wegen eingeschränkter Reichweite und Ladeinfrastrukturmängeln ungewollt auf Alternativen umgestiegen werden muss.

Range Extender

Nun werden ausschließlich die 46 Nutzer eines BMW i3 REX hinsichtlich des verbauten Range Extenders analysiert. Abbildung 62 stellt den geschätzten realen Anteil des Range Extender-Betriebs dem gewünschten Anteil der Auskunftspersonen gegenüber.

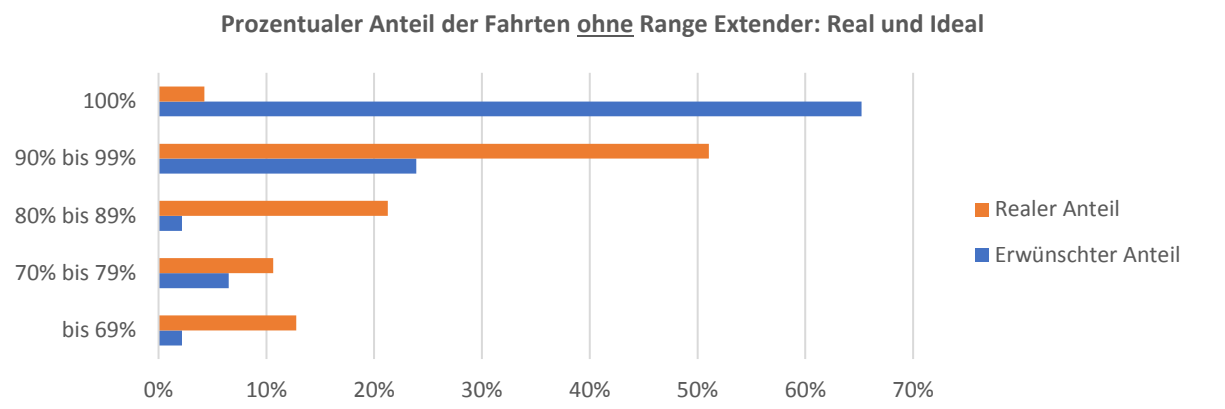


Abbildung 62: Prozentualer Anteil der Fahrten ohne Range Extender: Real und Ideal, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = 47$.

Nur 2 der 47 befragten User Chooser (4%) mit REX-Modell geben an, dass Sie 100% ihrer Fahrten mit dem Elektroauto ohne Zuschaltung des Range Extenders erfüllen konnten. Mehr als die Hälfte (51%) schaffte es bei mindestens 9 von 10 Fahrten auf die Unterstützung des Verbrennungsmotors zu verzichten. Nur 3 der 47 User Chooser (6%) mit REX-Modell geben an, dass sie weniger als die Hälfte Ihrer Fahrten ohne Verbrennungsmotorunterstützung bewältigt haben. Beinahe jeder Teilnehmer greift demnach auf den Range Extender zurück, allerdings geschieht dies bei einer übergroßen Mehrheit nur in Ausnahmefällen: 76% konnten mindestens 8 von 10 Fahrten ohne Range Extender-Einsatz erfüllen.

Der Vergleich des erwünschten mit dem realen Anteil der Fahrten mit Verbrennungsmotor-unterstützung macht deutlich, dass die befragten User Chooser gerne noch häufiger reinelektrisch unterwegs wären. 90% würden gerne mindestens 9 von 10 Fahrten ohne Zuschaltung des Range Extenders absolvieren. Während der 7 bis 9-monatigen Nutzung gelang dies aber nur 55% der Teilnehmer.2 von 3 befragten User Choosern (65%) geben an, am liebsten bei allen Fahrten auf den Range Extender zu verzichten. Für diese User Chooser stellt das Konzept also nur eine Notlösung dar, solange keine für sie adäquaten reinelektrischen Reichweiten möglich sind. Der Anteil der Fahrten ohne Range Extender-Einsatz liegt bei der Hälfte (51%) der befragten User Chooser im Rahmen der Erwartungen. Immerhin 36% geben an, dass der Anteil an reinelektrischen Fahrten während der 7 bis 9-monatigen Nutzung über den eigenen Erwartungen lag – der Range Extender also seltener als gedacht zum Einsatz kam. Nur jeder Zehnte (11%) gibt an, während der Nutzung im Alltag seltener reinelektrisch unterwegs gewesen zu sein als zunächst erwartet.

Abbildung 63 zeigt, in welchen Situationen aus Sicht der User Chooser immer reinelektrisch gefahren werden sollte.

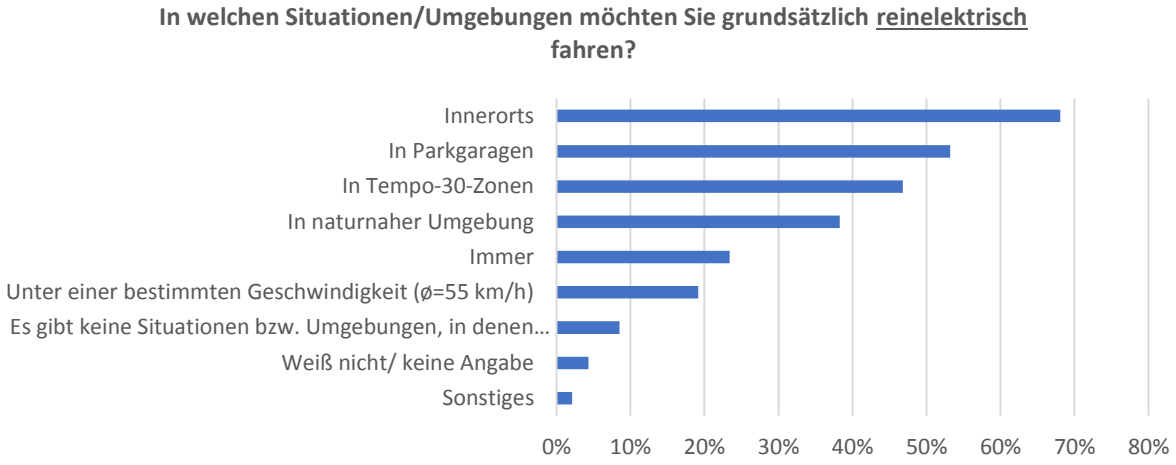


Abbildung 63: Situationen für reinelektrisches Fahren, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = 47$.

Nur jeder 12. befragte User Chooser (8,5%) mit Range Extender-Modell gibt an, dass es keine Situationen oder Umgebungen gibt, in denen er grundsätzlich reinelektrisch fahren möchte. Die restlichen Teilnehmer möchten am häufigsten innerorts reinelektrisch fahren (68%), dahinter folgen Parkgaragen (53%) und 30er-Zonen (47%). Ein interessantes Antwortverhalten ist bei dieser Forschungsfrage zu erkennen: 23% der befragten User Chooser mit Range Extender-Modellen nutzen ein offenes Feld zur freien Angabe um mittzuteilen, dass sie immer reinelektrisch fahren wollen.

Ein Drittel (32,6%) der befragten User Chooser stimmt der Aussage „Die Reichweitenreserve durch den Range Extender ist ausreichend“ uneingeschränkt zu. Weitere 24% stimmen weitgehend zu, 22% stimmen noch eher zu. Insgesamt 19% stimmen dieser Aussage eher nicht, weitgehend nicht oder gar nicht zu. 6,5% halten die Reichweitenreserve für gar nicht ausreichend. Insgesamt 82% stimmen der Aussage „Es ist mir wichtig, den Range Extender manuell zu- und abschalten zu können“ zu, darunter stimmt jeder Zweite (50%) völlig zu.

Verbesserungsbedarf beim Range Extender sehen 26 von 45 befragten User Chooser mit REX-Modell: Das ist mehr als jeder Zweite. Etwa gleichhäufig werden das eingeschränkte Tankvolumen, die Vorgehensweise bei der manuellen Zuschaltung, das Laufgeräusch sowie der hohe Kraftstoffverbrauch (geringe Energieeffizienz) bemängelt.

Geladener Strom und Ladeverhalten

Nur 2 von 102 befragten User Choosern stimmen der Aussage „Zum Laden [...] ist mir die Nutzung erneuerbarer Energien wichtig“ weitgehend oder gar nicht zu. Für beinahe alle Teilnehmer gehört grüner Strom zum Elektroauto dazu. Zwei Drittel (66%) stimmen der Aussage, dass Elektroautos ausschließlich mit grünem Strom gefahren werden sollten eher, weitgehend oder völlig zu. 68% lehnen die Aussage, dass Elektroauto auch ohne grünen Strom umweltfreundlich genug sind eher (21%), weitgehend (20%)

oder völlig (28%) ab. Für eine klare Mehrheit ist grüner Strom für eine positive Umweltbilanz ihres Elektroautos Voraussetzung. Abbildung 64 zeigt noch einmal welche Stromtarife für das Laden der Elektroautos verwendet werden.

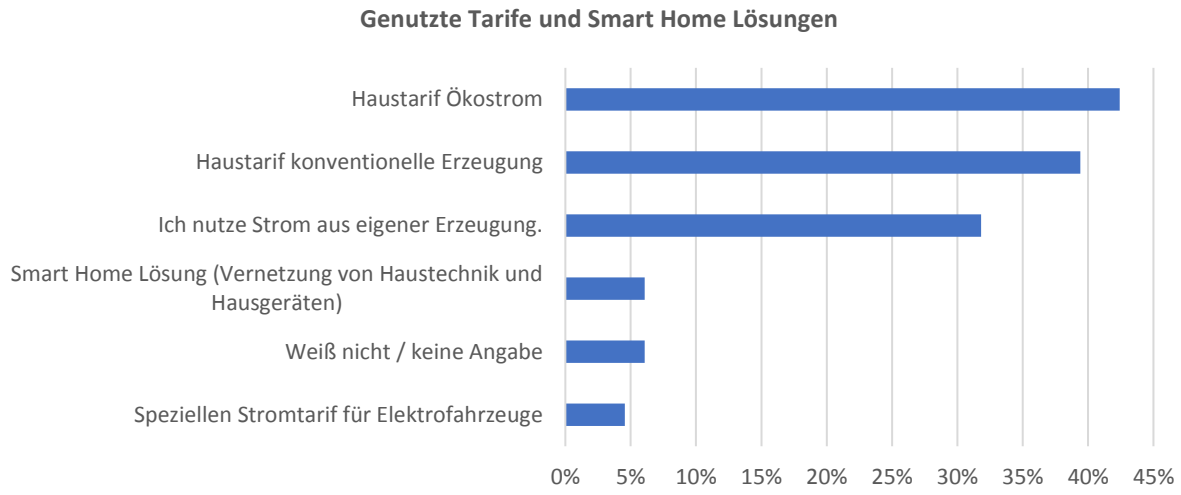


Abbildung 64: Genutzte Tarife und Smart Home Lösungen, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = 66$.

42% der befragten User Chooser nutzen einen Ökostrom-Haustarif zum Laden ihres Elektroautos. 39% geben an, den Haustarif für Strom aus konventioneller Erzeugung zum Laden zu nutzen. Autostromverträge (5%) mit eigenen Tarifen und Smart Home Lösungen (6%) sind nur wenig verbreitet. Immerhin jeder Dritte (31%) gibt darüber hinaus an, dass (auch) Strom aus eigener Erzeugung zum Laden verwendet wird, wobei passenderweise ein Drittel der befragten User Chooser (32%) angibt, dass sie Strom am eigenen Wohnort selbst erzeugen können. 67% haben dagegen keine Möglichkeit Zuhause Strom zu erzeugen. Eine ähnliche Verteilung ergibt sich auch für den Arbeitsort: 35% geben an, dass ihr Betrieb Strom dort selbst erzeugen kann, 64% haben keine Möglichkeit auf innerbetrieblich erzeugten Strom zurückzugreifen.

Abbildung 65 zeigt die Wichtigkeit der Ladeorte aus Sicht der User Chooser.

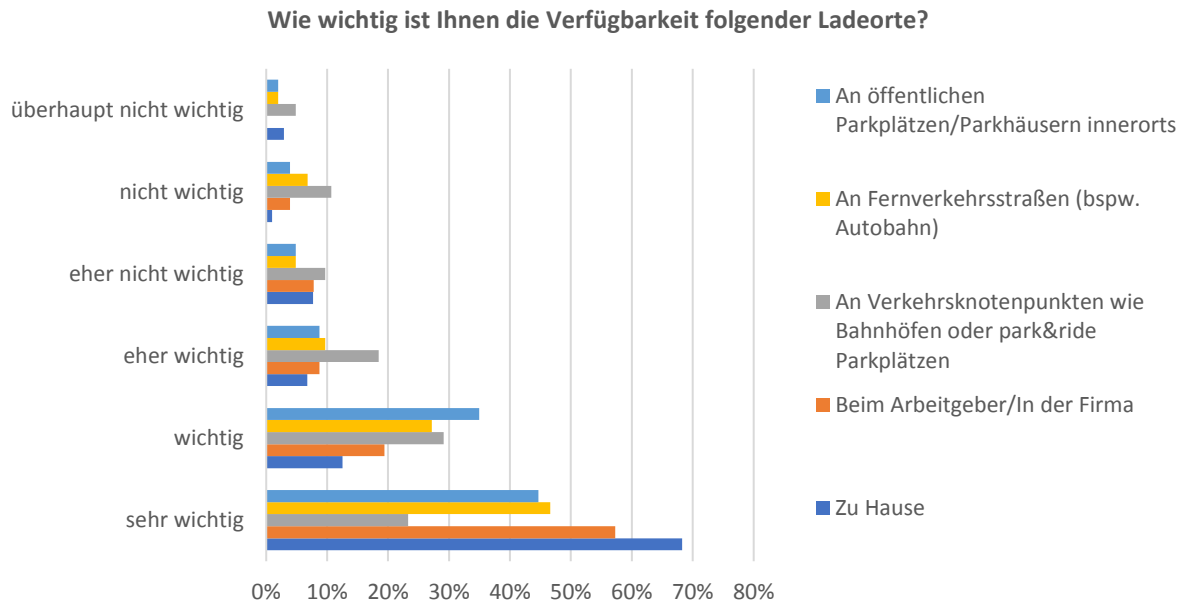


Abbildung 65: Wichtigkeit der Ladeorte, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = 104$.

Den befragten User Choosern ist das Laden privat zu Hause (68%) und in der Firma (57%) mehrheitlich sehr wichtig. Etwas geringere Werte ergeben sich für Fernverkehrsstraße und öffentliche Parkplätze/Parkhäuser. Verkehrsknotenpunkte (Bahnhöfe, Park&Ride-Parkplätze) werden als Ladeorte von einem Viertel der Befragten (26%) als eher nicht wichtig, nicht wichtig, oder überhaupt nicht wichtig beurteilt. Keiner der Ladeorte wird mehrheitlich als unwichtig bewertet.

Welche Technologien an welchem Ladeort aktuell verwendet werden zeigt Abbildung 66.

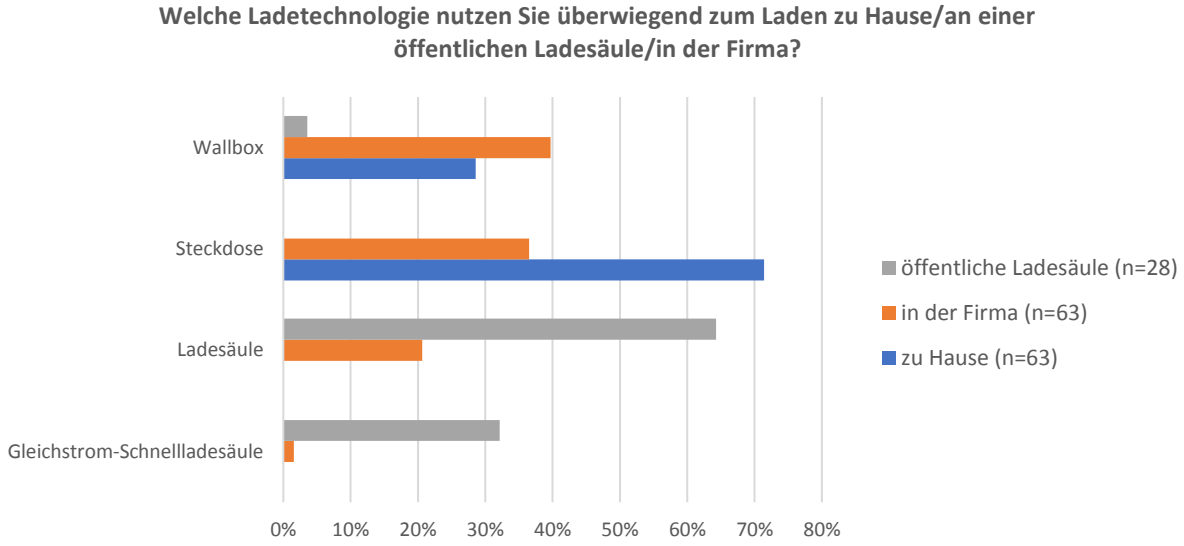


Abbildung 66: Ladetechnologie je Ladeort, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = n$.

Bei den üblichen Ladeorten führt das Heimladen (64%) knapp vor dem Laden in der Firma (62%). Nur 28 von 104 befragten User Choosern laden ihr Elektroauto üblicherweise auch an einer öffentlichen Ladesäule auf (27%). 3 von 4 User Choosern verzichten auf eine übliche Nutzung von öffentlichen Ladesäulen.

Betrachtet man das Detailurteil der üblicherweise (auch) öffentlich ladenden Auskunftspersonen, so ergeben sich interessante Einsichten. 65% der User Chooser, die ihr Elektroauto üblicherweise (auch) an einer öffentlichen Ladesäule aufladen, tun dies nach eigenen Angaben an einer Wechselstrom-Ladesäule. Der hohe Anteil des öffentlichen Gleichstromschnellladens (32%), ist auf die 14 Tesla-Fahrer in der Stichprobe zurückzuführen: Diese können exklusiv die Tesla-eigenen Supercharger mit Gleichstromschnellladung nutzen. Jeder Fünfte (19%) gibt an, dass sehr häufig wegen fehlender öffentlicher Ladesäulen auf das Nachladen verzichtet werden musste, bei weiteren 30% war dies häufig, bei 40% gelegentlich der Fall. Bei jedem Zweiten verhinderten Fremdparker (50%) das öffentliche Nachladen gelegentlich, bei 32% kam dies häufig vor. Immerhin 65% geben an, dass sie gelegentlich wegen belegter Anschlüsse nicht an einer öffentlichen Ladesäule nachladen konnten, bei 21% kam das sogar häufig vor. Selbst für die geringe Zahl von Elektroautos sind offensichtlich nicht genügend Anschlüsse verfügbar. 39% geben an, dass die Freischaltung/Authentifizierung an der Ladesäule gelegentlich fehlschlug.

67 der befragten 104 User Chooser laden ihr Elektroauto üblicherweise auch zu Hause (65%). Mehrheitlich sind für das private Laden zu Hause Steckdosen im Einsatz (71%). Neben den üblichen Haushaltssteckdosen zählen dazu aber auch 6 User Chooser mit „Baustrom“ (380 V / 32 A). Nur eine Minderheit (29%) kann für das Heimladen auf eine eigene Wallbox zurückgreifen. Die private Lademöglichkeit ist mit 46% am häufigsten in der privaten Garage installiert. In 22% der Fälle befindet sich die private Lademöglichkeit an einem privaten Stellplatz mit Überdachung (Carport), bei 16% an einem privaten Stellplatz ohne Überdachung. Der hohe Steckdosen-Anteil (71%) bedingt eine relativ geringe durchschnittliche Ladegeschwindigkeit: 24% der befragten zu Hause ladenden User Chooser sind mit der Ladegeschwindigkeit zu Hause eher unzufrieden. Jeweils 2 weitere User Chooser sind weitgehend oder vollkommen unzufrieden (Summe: 30%). Die Zufriedenheitswerte mit der Ladegeschwindigkeit sind trotzdem recht hoch: 15% sind vollkommen zufrieden, 24% weitgehend und 28% eher zufrieden. Viele kommen mit der Ladegeschwindigkeit einer Steckdose beim Heimladen gut aus.

18% der befragten User Chooser stimmen der Aussage „Die Ladenzeiten lassen sich nicht mit meinem Tagesablauf im Beruf vereinbaren.“ völlig zu, weitere 13% stimmen weitgehend zu, 10% stimmen eher zu (Summe: 41%). Zunächst widersprüchlich dazu erscheint die geringe Zustimmung (11%) zur Aussage, dass der eigene Berufsalltag an den Ladezeiten des Elektroautos ausgerichtet werden muss. Möglicherweise werden im Bedarfsfall aber zunächst alternative Pkw oder andere Verkehrsmittel herangezogen, worauf auch die signifikanten Unterschiede zwischen Erst- (t_0) und Zweitbefragung (t_1) hindeuten. Bei der Zweitbefragung nach 7 bis 9-monatiger Nutzung stimmen die Befragten der Aussage, den Berufsalltag an den Ladezeiten ausrichten zu müssen, statistisch signifikant seltener zu (p-Wert 0,033). Möglicherweise haben sich mittlerweile Ausweichroutinen mit konkreten Plänen und Vorgehensweisen (bspw. Or-

ganisation des Fahrzeugwechsels) eingespielt, um den Alltag trotz der langen Ladezeiten unberührt vollziehen zu können. Die differenzierte Antwort der User Chooser auf diese Aussage wird in Abbildung 67 illustriert:

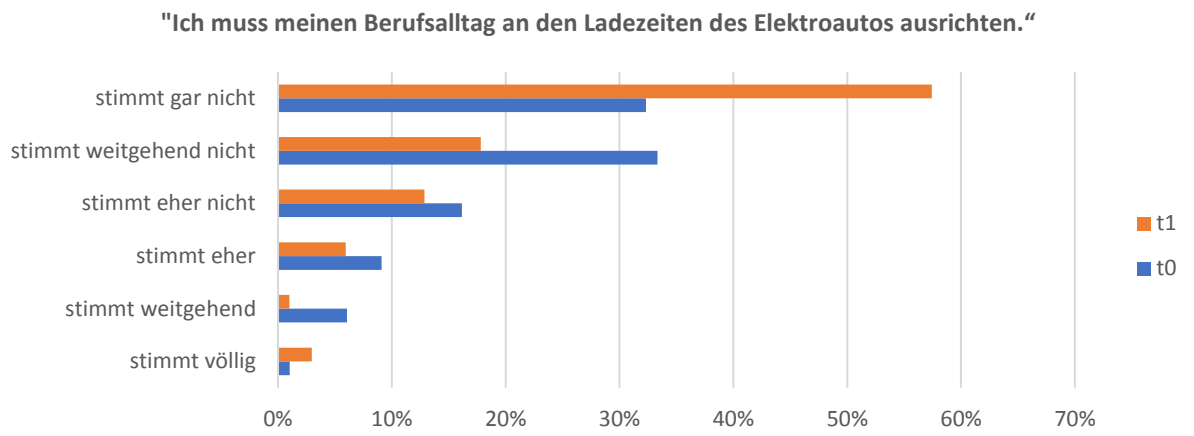


Abbildung 67: Ausrichten des Alltags an das Elektroauto, Befragungszeitpunkt: t_0/t_1; $n_{UC} = 101$.

Kosten

Nur 17 von 102 befragten User Choosern (16,5%) zeigen eine Aufschlagbereitschaft auf ihren monatlich zu versteuernden geldwerten Vorteil für die Elektro-Version eines fiktiven Verbrenner-Modells. Andererseits haben für etwas mehr als die Hälfte (55%) der 66 selbständigen User Chooser die Gesamtbetriebskosten bei der Anschaffung ihres Elektroautos keine Rolle gespielt. Von der Mehrheit in die Gesamtbetriebskosten mit einkalkuliert werden üblicherweise die Treibstoff- bzw. Energiekosten (86%), die Anschaffungskosten (83%), die Kfz-Steuer (76%), die Versicherung (66%) und die Wartungs- bzw. Pflegekosten (65%).

In Abbildung 68 sind die Gesamtbetriebskosten der Projektfahrzeuge der User Chooser ersichtlich.

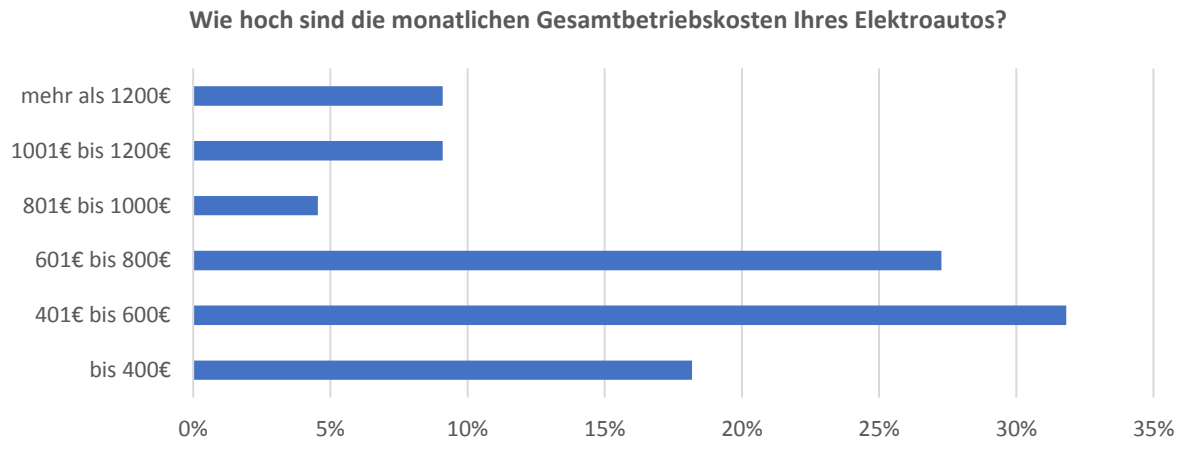


Abbildung 68: Gesamtbetriebskosten des Elektroautos, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = 22$.

Da für weniger als die Hälfte die Gesamtbetriebskosten keine Rolle bei der Anschaffung der Elektroautos gespielt haben, machen auch nur 22 der 66 selbständigen User Chooser Angaben zu den monatlichen Gesamtbetriebskosten ihrer Elektroautos: 8 von 10 Elektroautos in der Stichprobe sind BMW i3. Hier liegen die monatlichen Gesamtbetriebskosten nach Angabe der befragten User Chooser im Durchschnitt bei 491 € pro Monat für den BEV und 629 € pro Monat für den REX. Beim Tesla Model S liegen die monatlichen Gesamtbetriebskosten bei geschätzten 1387€.

Die zusätzlich entstandenen Kosten neben den Gesamtbetriebskosten des Elektroautos wurden in Abbildung 69 erfasst.

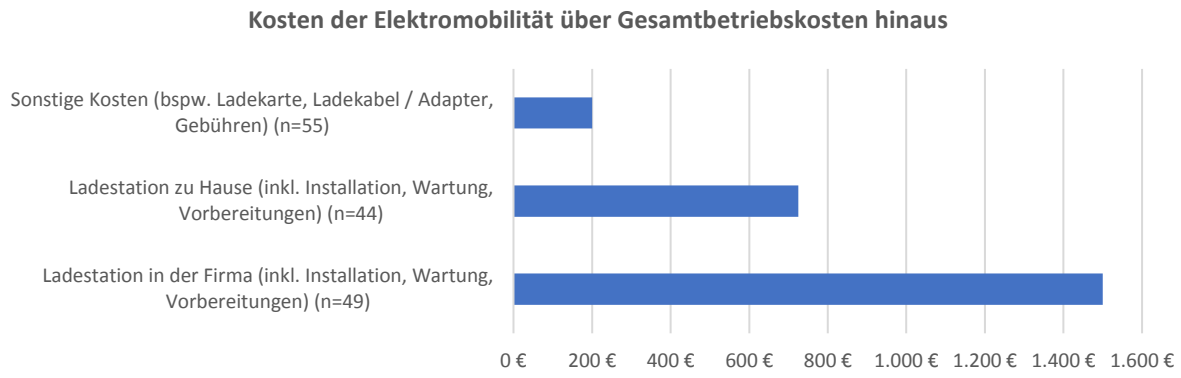


Abbildung 69: Kosten der Elektromobilität über Gesamtbetriebskosten hinaus, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = n$.

Die Standardabweichung vom Mittelwert der Angaben ist vor allem bei den zusätzlichen Kosten in der Firma sehr hoch. Offensichtlich sind die zusätzlichen Kosten in den Betrieben stärker von den örtlichen Gegebenheiten, den jeweiligen Wünschen und Anforderungen der Nutzer, sowie vom Commitment des Betriebs beim Thema Elektromobilität abhängig. Im Durchschnitt sind für die Lademöglichkeit zu Hause knapp 900 € angefallen, im Betrieb mit 2300 € mehr als das Doppelte. Der Median für die Kosten der Ladestation in der Firma liegt bei 1.500 €, zu Hause bei 725 € und für sonstige Kosten bei 200 €.

Gesamturteil

Nach mehrmonatiger Nutzung beurteilen die befragten 104 User Chooser den Fahrspaß mit Elektroautos besonders positiv. 82% stimmen der Aussage „Das Fahren von Elektroautos vermittelt Fahrfreude“ uneingeschränkt zu. Die Aussage „Elektroautos sind für meinen Berufsalltag geeignet.“ findet bei 44% uneingeschränkte Zustimmung, bei der Aussage „Elektroautos sind für meinen privaten Alltag geeignet.“ liegt Anteil uneingeschränkter Zustimmung mit 37% etwas niedriger. Weitgehend stimmen 30% bzw. 32% diesen beiden Aussagen zu (Summe: 74% bzw. 69%). Etwa jeder Zehnte stimmt den Aussagen dagegen nicht zu.

Mit zunehmender Fahrerfahrung ändert sich die globale Einstellung der befragten User Chooser zu ihren Projektfahrzeugen nicht signifikant. Auch nach 7 bis 9-monatiger Nutzung zeigt sich eine überwiegend positive Einstellung gegenüber Elektroautos und deren Einsatz im Alltag bei den befragten User

Choosern: 74% lehnen die Aussage „Ich bin von Elektroautos nicht überzeugt.“ völlig ab. Allerdings wird gleichzeitig deutlich, dass ein vollständiger Verzicht auf Verbrenner-Pkw vielfach weder im privaten noch im beruflichen Kontext als möglich erachtet wird. Das Urteil zur Aussage „Als einzige Pkw in meinem Haushalt sind Elektroautos nicht geeignet.“ ist bei den Auskunftspersonen gespalten: Einerseits stimmen 30% dieser Aussage uneingeschränkt zu, andererseits lehnen 20% sie völlig ab. Offensichtlich unterscheiden sich die Mobilitätsaufgaben von und Anforderungen an Firmen-Pkw in den User Chooser-Betrieben teils erheblich voneinander, daneben können die folgenden modellspezifischen Gruppenvergleiche einen Teil des polarisierten Antwortverhaltens erklären.

Bei User Choosern eines reinelektrischen BMW i3 liegt der Grad der Zustimmung zu der Aussage „Als einzige Pkw im Fuhrpark […] sind Elektroautos nicht geeignet“ knapp signifikant höher als bei Besitzern der Range Extender-Version (p-Wert: 0,049). Ein sehr hohes Signifikanz-Niveau wird beim Vergleich der Zustimmungswerte zur Aussage „Als einzige Pkw in meinem Haushalt sind Elektroautos nicht geeignet.“ Erreicht (p-Wert: 0,006). Beinahe 47% der User Chooser mit reinelektrischen BMW i3 stimmen dieser Aussage völlig zu. Unter Range Extender-Besitzern sind es nur 20%. Eine differenzierte Darstellung der Antworten der User Chooser zu dieser Aussage ist in Abbildung 70 illustriert.

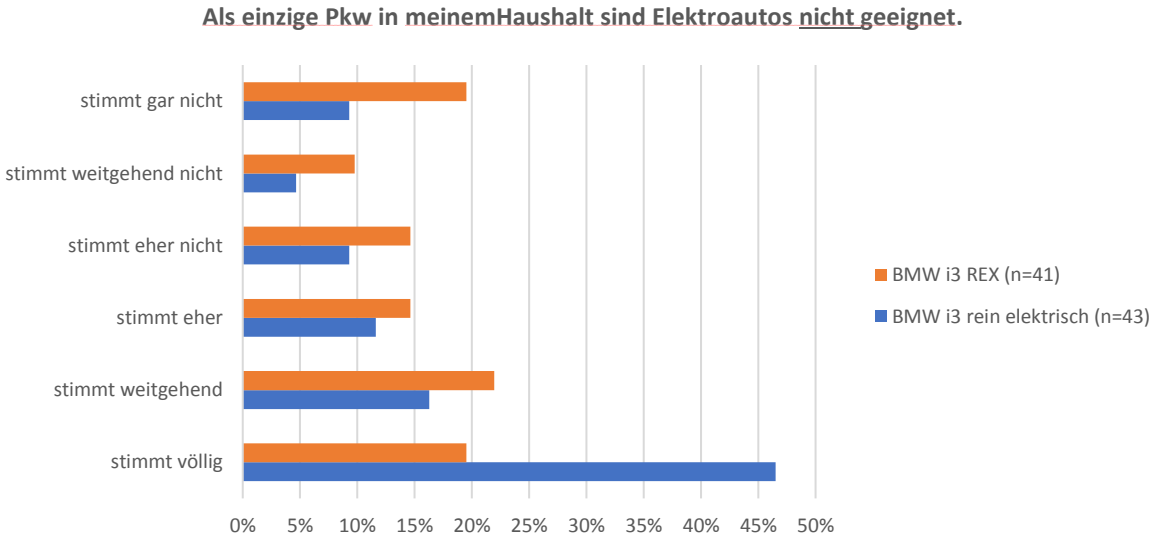


Abbildung 70: Eignung von Elektroautos als einziges Fahrzeug im Haushalt, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = n$.

Durch den Range Extender wird der BMW i3 demnach vermehrt als vollwertiger Verbrenner-Ersatz wahrgenommen.

Nur 4 von 104 befragten User Choosern stimmen der Aussage „Die Entscheidung, mein Elektroauto anzuschaffen, war absolut richtig“ nach mehrmonatiger Nutzung eher nicht oder weitgehend nicht zu. Keine Auskunftsperson stimmt gar nicht zu. Dagegen stimmen 64% der Aussage „Ich bin froh, mein Elektroauto angeschafft zu haben“ uneingeschränkt zu, weitere 27% stimmen weitgehend zu, 4% stimmen eher zu. Tendenziell würden sich nur 4% der befragten User Chooser heute nicht noch einmal für die Anschaffung

ihres Elektroautos entscheiden. Am Beginn der Nutzung (t_0) lag der Anteil mit 9% höher. Nur ein einziger User Chooser stimmt der Aussage „Ich bereue meine Entscheidung, mein Elektroauto angeschafft zu haben.“ völlig zu, weitere 3 stimmen eher zu. Dagegen stimmen 84,5% dieser Aussage gar nicht zu. Schließlich würden nur 8 Auskunftspersonen sich heute anders entscheiden, wenn sie ihre damalige Entscheidung zur Anschaffung des Elektroautos nach 7 bis 9-monatiger Nutzung rückblickend betrachten.

In Abbildung 71 sieht man die Tipps, die die User Chooser Personen geben würden, die sich ein Elektroauto anschaffen wollen. Die Frage wurde offen ohne vorgegebene Antwortkategorien gestellt.

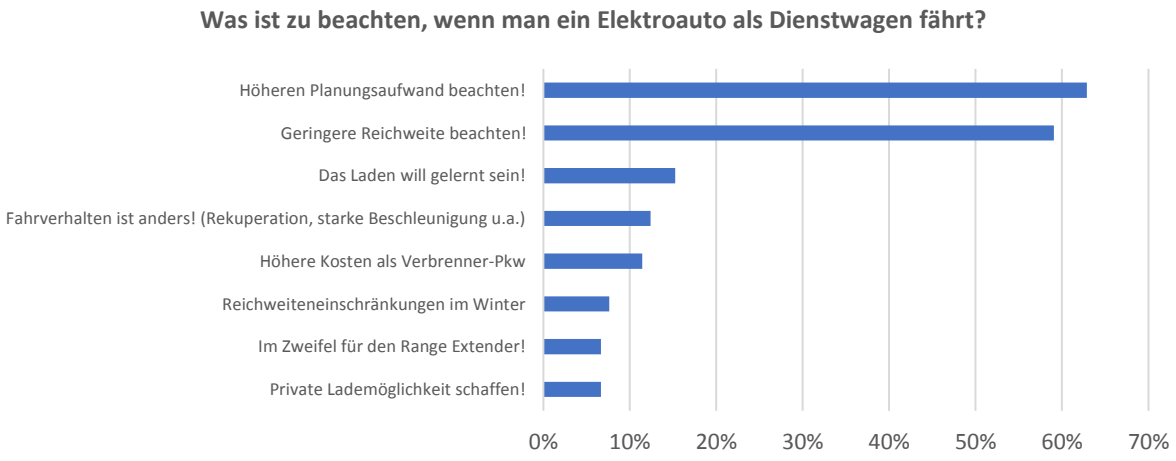


Abbildung 71: Tipps an Personen, die ein Elektroauto fahren wollen, Befragungszeitpunkt: t_0; $n_{UC}(t_0) = 106$.

Einer Person, die sich überlegt ein Elektroauto als Dienstwagen anzuschaffen, würden die befragten User Chooser am häufigsten den Tipp geben, dass das Elektroauto im Alltag einen höheren Planungsaufwand erforderlich macht (63%). Außerdem sollte man sich bei der Anschaffungsentscheidung der geringeren Reichweite bewusst sein (59%) und bedenken, dass das Thema Laden komplexer als das Thema Tanken ist (15%). Man muss hier beispielsweise die Ladezeiten und Ladeinfrastruktur beachten.

Die User Chooser haben sich nach eigenen Angaben während des Nutzungszeitraums häufig als Change Agents betätigt. 58% stimmen der Aussage „Ich habe Anderen positiv über mein Elektroauto berichtet“ völlig zu, weitere 31% stimmen weitgehend zu, 9% stimmen eher zu. Die Zustimmungswerte liegen deutlich über denjenigen der ebenfalls befragten Gruppen Fuhrparkleiter und Poolnutzer. Die befragten User Chooser zeichnen sich damit erneut als typische Early Adopter aus: Sie besitzen ein ausgeprägtes Kommunikationsverhalten und können durch „Mundpropaganda“ wertvolle Hilfe für die Marktdurchdringung von Elektroautos leisten.

Ausblick

Unter den befragten User Choosern plant jeder Dritte (32%) im Jahr 2017 einen neuen Dienstwagen anzuschaffen. Darunter werden 42% in den kommenden 12 Monaten ein reinelektrisches Modell als neuen Dienstwagen anschaffen, 32% kehren dagegen zum Verbrenner zurück. Jeweils 13% werden voraussichtlich einen Plug In-Hybrid oder ein Elektroauto mit Range Extender neu anschaffen. Der größte Teil der befragten User Chooser nennt BMW-Modelle als nächsten Dienstwagen (29 mal), darunter am häufigsten den BMW i3 sowohl in reinelektrischer als auch in Range Extender-Ausführung. Ebenfalls mehrfach genannte Elektroautos sind der Opel Ampera-e (5 mal) und das Tesla Model S (5 mal).

Die Auskunftspersonen wurden darüber hinaus gefragt, welche Maßnahmen Elektroautos als Dienstwagen attraktiver machen würden. Abbildung 72 zeigt die Ergebnisse dieser Forschungsfrage.

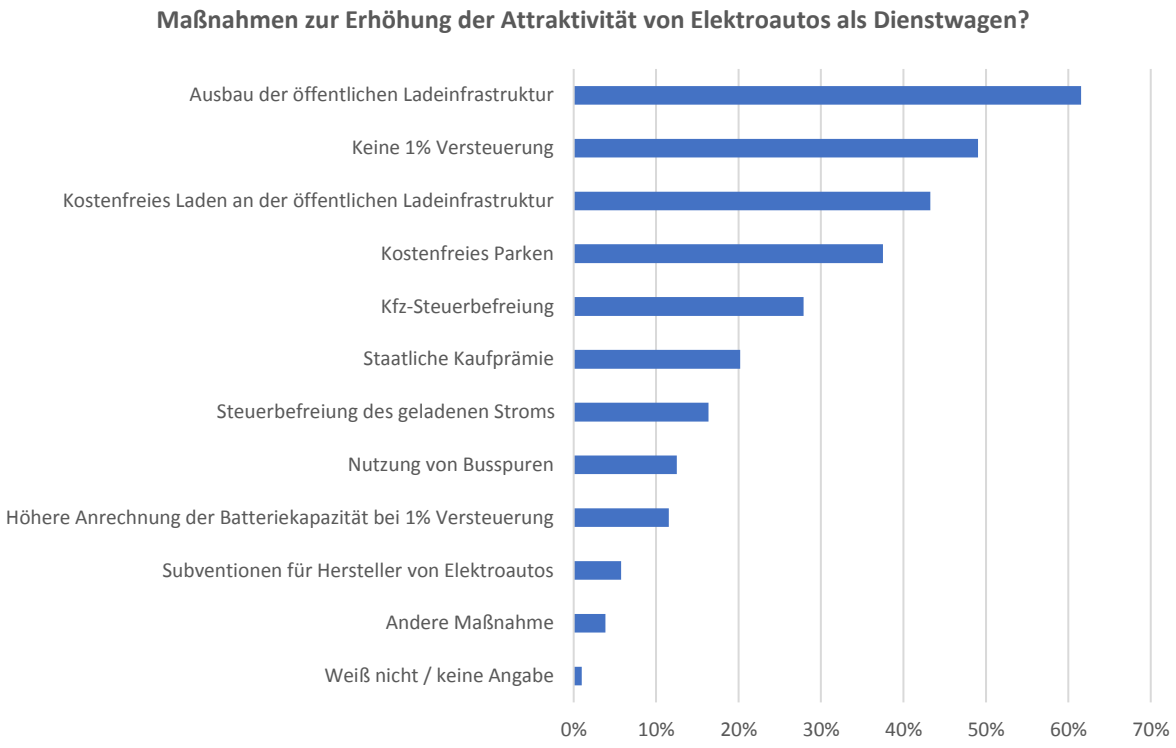


Abbildung 72: Maßnahmen um Elektroautos als Dienstwagen attraktiver zu machen, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_{UC}(t_1) = 104$.

Die drei effektivsten Maßnahmen zur Steigerung der Attraktivität von Elektroautos als Dienstwagen sind der Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur (62%), die vollständige Befreiung von der 1% Versteuerung (49%) und kostenfreies öffentliches Laden (43%). Bereits implementierte Maßnahmen, wie etwa die staatliche Kaufprämie (20%), liegen nur im Mittelfeld.

3.1.16 AP 4530 Statistische Auswertung von Befragungen der Auskunftsgruppe Poolfahrzeugnutzer

Stichprobenbeschreibung

Die Flottennutzer-Stichprobe enthält 326 Poolfahrzeugnutzer aus den 242 Betrieben, die an beiden Befragungsrunden vollständig teilgenommen haben. Abbildung 73 zeigt die Verteilung der Projektfahrzeug-Modelle unter den befragten Poolnutzern.

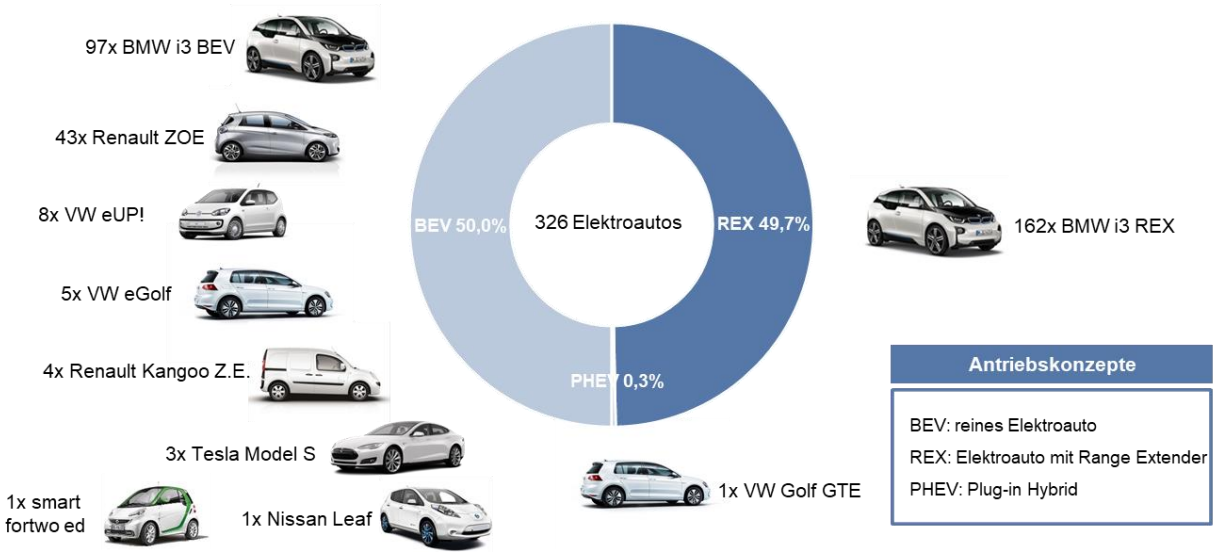


Abbildung 73: Modellverteilung Flottennutzer

Die Flottennutzer nutzen zu fast identischen Anteilen BEV und REX Modelle. Das häufigste Modell der Poolnutzer ist der BMW i3 mit Range Extender (162 mal), dahinter folgen der reinelektrische BMW i3 (97 mal) und der Renault ZOE (43 mal).

Der Anteil weiblicher Poolnutzer in der Stichprobe liegt bei 18%, in Deutschland beträgt der Anteil von Frauen an allen Erwerbstätigen dagegen 45%. Frauen sind in der Poolnutzer-Stichprobe somit unterrepräsentiert. Das Durchschnittsalter der befragten Poolnutzer beträgt 43 Jahre, während der Altersdurchschnitt der Erwerbstätigen in Deutschland 40 Jahre beträgt. Der älteste Teilnehmer ist 65 Jahre alt, der jüngste Teilnehmer ist 20 Jahre alt. Jüngere Erwerbstätige unter 30 Jahren sind in der Stichprobe unterrepräsentiert.

Die befragten Poolnutzer haben im Durchschnitt einen höheren beruflichen Bildungsstand als der Durchschnitt der Erwerbstätigen in Deutschland. Fast 50% haben einen akademischen Grad erlangt (3% Promotion, 26% Diplom/Master Uni, 20% Bachelor, Diplom FH). Nur 3% geben an über keinen beruflichen Abschluss zu verfügen. Ein Drittel (32%) verfügt über eine abgeschlossene Berufsausbildung oder Lehre. Abbildung 74 zeigt, in welchem Unternehmensbereich die Poolnutzer arbeiten.

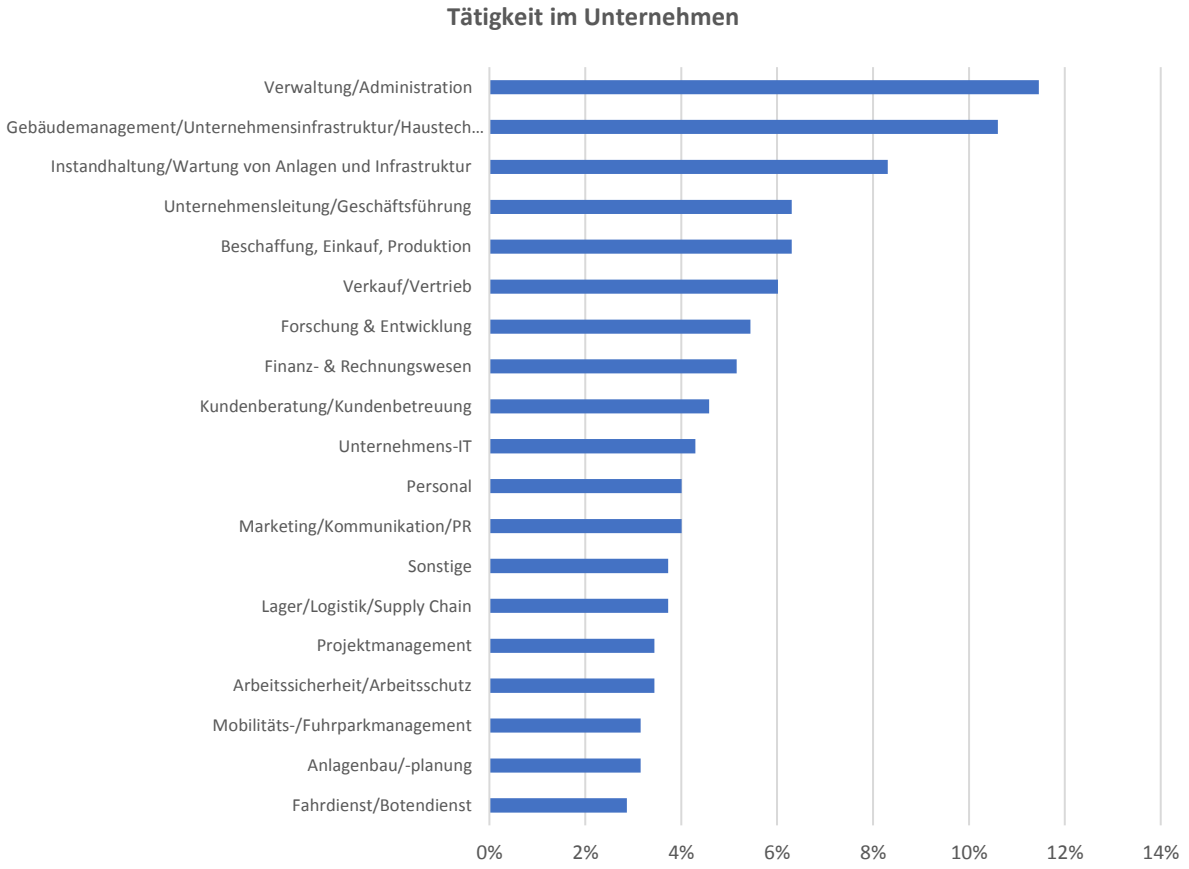


Abbildung 74: Tätigkeit im Unternehmen, Befragungszeitpunkt: t_0; $n_N(t_0) = 349$.

Die Unternehmensbereiche, in denen die befragten Poolnutzer tätig sind, sind breit gestreut. Am häufigsten wird der Unternehmensbereich Verwaltung/Administration genannt (11%), dicht dahinter folgt der Bereich Gebäudemanagement, Unternehmensinfrastruktur und Haustechnik (11%), an dritter Stelle liegt Instandhaltung, Wartung von Anlagen und Infrastruktur (8%). Nach innen gerichtete Unternehmensbereiche erreichen damit die höchsten prozentualen Anteile. Die klassischen Bereiche wie Verkauf/Vertrieb, Produktion oder Geschäftsführung folgen erst dahinter. 60% der befragten Poolnutzer sind Mitarbeiter, 33% haben eine Leitungsfunktion und 7% sind Geschäftsführer oder Vorstände.

Das durchschnittliche Haushaltsnettoeinkommen der Stichprobe beträgt 4229 € (Indexwert: 135%). Im Bundesdurchschnitt beträgt das Haushaltsnettoeinkommen 3132 € (Indexwert: 100%). Eine Erklärung für das überdurchschnittliche Haushaltseinkommen der Teilnehmer, ist der überdurchschnittlich hohe Anteil von größeren Betrieben und Großunternehmen in der Stichprobe. In solchen Unternehmen werden in der Regel auch höhere Gehälter gezahlt. 7% der befragten Poolnutzer verfügen sogar über ein Haushaltseinkommen von 7.500 € oder mehr.

Innovationen einer Branche werden nicht von allen Nutzern gleich schnell adoptiert. Die Forschung hat deshalb das Konzept der persönlichen Innovativeness (deutsch: Innovativität) entwickelt. Je höher die

persönliche Innovativeness eines Menschen, desto schneller werden Innovationen für den eigenen Alltagsgebrauch adoptiert.[20] Insgesamt 15% der befragten Poolnutzer geben an, dass ihre eigenen Autos schon in der Vergangenheit tendenziell über mehr Innovationen verfügten als diejenigen ihrer Kollegen und Bekannten. Nur 4% stimmen der zugehörigen Aussage voll und ganz zu. Die Werte der im Rahmen des Vorhabens ebenfalls befragten User Chooser liegen um ein Vielfaches höher. Trotz einer relativ geringen Innovativeness stimmen 17% der Aussage voll und ganz zu, dass sie es mögen Innovationen der Autobranche vor anderen Leuten zu nutzen, weitere 23% stimmen der Aussage überwiegend zu. 20% stimmen eher zu (Summe: 60%). Immerhin jeder Vierte (27%) der befragten Poolnutzer würde sich selbst auf dem Gebiet der Elektromobilität tendenziell als Experte bezeichnen. Drei Viertel der Befragten (76%) verfolgen Neuigkeiten zum Thema Elektromobiliät nach eigenen Angaben aufmerksam. 15% stimmen der Aussage „Ich weiß mehr über die Elektromobilität als meine Arbeitskollegen und andere Menschen in meinem Umfeld." uneingeschränkt zu. Das eigene Wissen zum Thema wird überraschend hoch eingeschätzt: 13% stimmen der Aussage „Ich weiß viel über die Elektromobilität." uneingeschränkt zu, 32% stimme überwiegend und 33% noch eher zu. Die Poolnutzer attestieren sich einen sehr soliden Wissensstand zum Thema.

Beinahe alle befragten Poolnutzer (92%) bezeichnen sich selbst als umweltbewusste Menschen. Immerhin 15% stimmen der zugehörigen Aussage voll und ganz zu. Hierbei ist aber zu erwähnen, das soziale Erwünschtheit das Antwortverhalten beim Thema Umweltbewusstsein i. d. R. besonders stark beeinflusst.[21] Jeder Zehnte (10%) stimmt der Aussage „Es ist mir wichtig, dass ich ein Auto fahre, das die Umwelt nur gering belastet." voll und ganz zu, weitere 30% stimmen überwiegend zu. Bei den im Rahmen des Vorhabens ebenfalls befragten User Choosern mit Elektro-Dienstwagen, lag der Wert der uneingeschränkten Zustimmung zu dieser Aussage allerdings bei 34% und damit 3x so hoch.

Abbildung 75 zeigt, welche Mobilitätsformen die Flottennutzer für ihre dienstliche Mobilität benutzen.

[20] Vgl. Rogers (2003)

[21] Vgl. Neugebauer (2004), S. 16.

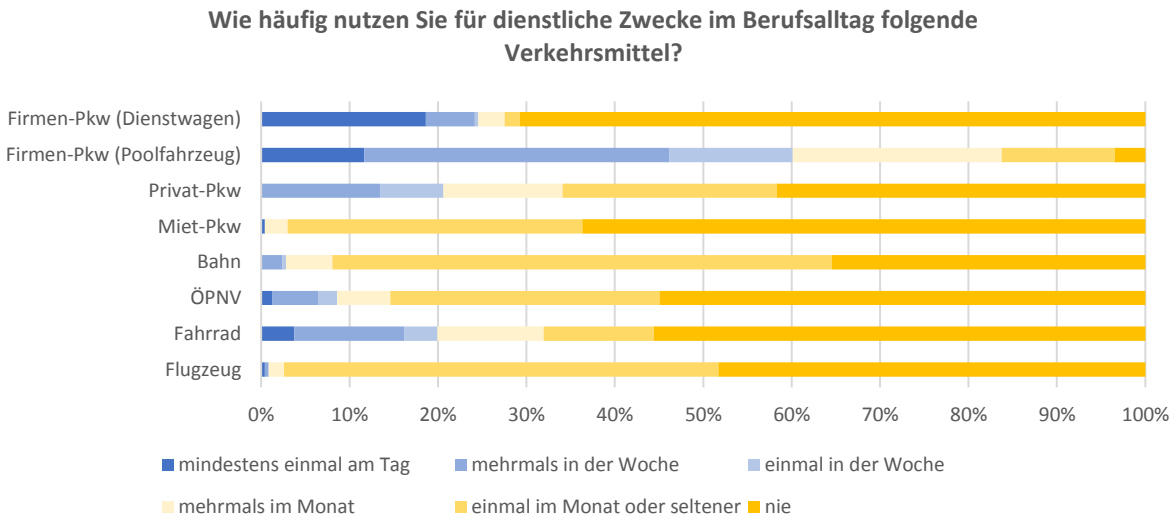


Abbildung 75: Lösungen der dienstlichen Mobilität, Befragungszeitpunkt: t_0; $n_N(t_0) = 360$.

12% der befragten Poolnutzer geben an, mindestens einmal am Tag mit Pool-Pkw der Firma unterwegs zu sein, 34% mehrmals pro Woche, 14% einmal pro Woche. 40% nutzen seltener als einmal in der Woche Pool-Pkw der Firma. Die Jahresfahrleistungen mit Pool-Pkw verteilen sich wie folgt: 17% fahren bis zu 500 km pro Jahr, 23% zwischen 500 bis unter 2.000 km, 26% geben an zwischen 2.000 und 5.000 km pro Jahr zu fahren, 22% zwischen 5.000 bis unter 10.000 km. 20% fahren 10.000 km pro Jahr oder mehr. Auch der Privat-Pkw wird häufiger für Dienstfahrten genutzt: 13% nutzen den Privatwagen sogar mehrmals pro Woche dienstlich. Recht häufig wird das Fahrrad für Dienstfahrten genutzt. Bei 21% ist dies mindestens einmal in der Woche der Fall.

292 von 321 befragten Poolnutzern (91%) steht im Bedarfsfall ein konventioneller Firmen-Pkw zur Verfügung, um etwa bei längeren Fahrtstrecken darauf ausweichen zu können. 29 Teilnehmer (9%) verfügen über keine Alternative zum Elektroauto. Unter denjenigen Poolnutzern, die auf eine konventionelle Alternative im Bedarfsfall zurückgreifen können, geben wiederum 58% an, dass sie mit dem Elektroauto nichtsdestotrotz die meisten Dienstfahrten im Arbeitsalltag unternehmen. 40% bewältigen dagegen nach eigenen Angaben mehr Fahrten im Arbeitsalltag mit anderen Firmen-Pkw, als mit dem Elektroauto.

Ziele und Motive

In Abbildung 76 werden die Nutzungsmotive der Poolnutzer illustriert.

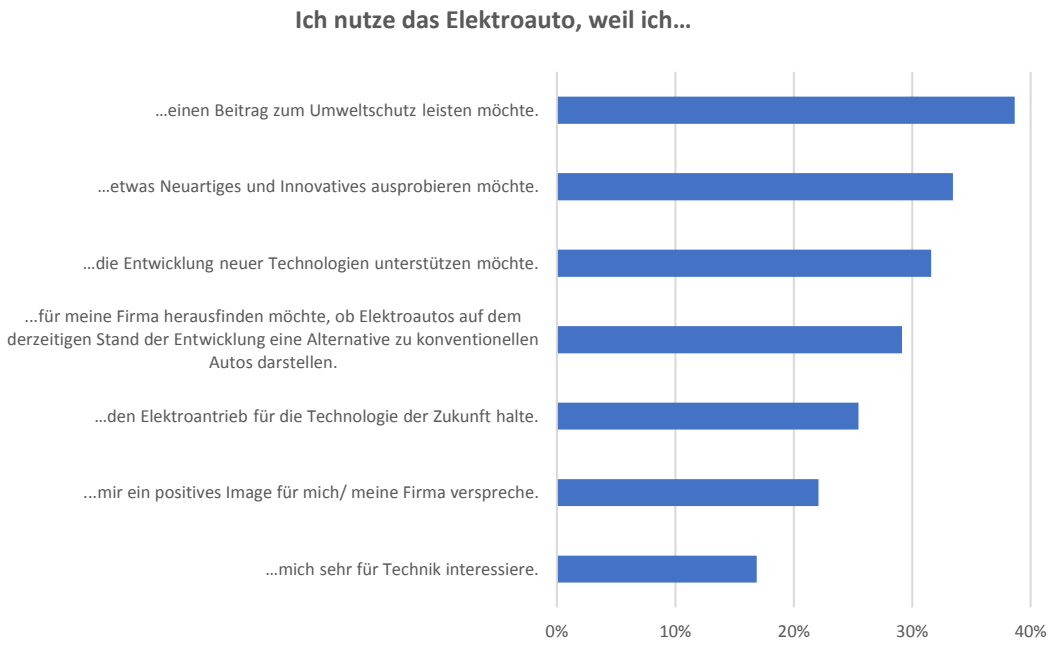


Abbildung 76: Nutzungsmotive Flottennutzer, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_N(t_1) = 326$.

Am häufigsten unter den 3 wichtigsten Nutzungsmotiven werden Umweltschutz (39%), Neugier auf Innovation (33%) und Unterstützung bei der Entwicklung neuer Technologien (32%) genannt. Die wichtigsten Nutzungsmotive sind breit gefächert. Imagegründe spielen für die befragten Poolnutzer eine untergeordnete Rolle, denn nur 22% nennen diese unter ihren 3 wichtigsten Nutzungsmotiven. Die Nutzung des Elektroautos ist scheinbar überwiegend intrinsisch motiviert: Nur 9% der befragten Poolnutzer geben an keine Wahl zu haben. 14% nennen unter ihren 3 wichtigsten Nutzungsmotiven den Aspekt, von der Firma gebeten worden zu sein.

Eine große Mehrheit der befragten Poolnutzer (93%) hält die Nutzung der Elektroautos für sinnvoll, was vermutlich auf die als besonders positiv wahrgenommene Umweltbilanz (auch wichtigster Vorteil) zurückzuführen ist. Ein Blick zurück auf die Nutzungsmotive macht deutlich, dass es auch viele Auskunftspersonen für sinnvoll erachten, eine Zukunftstechnologie heute schon in der Firma auszuprobieren. 2 von 3 befragten Poolnutzern (67%) lehnen die Aussage völlig, überwiegend oder eher ab, dass die Nutzung der Elektroautos für sie notwendig ist. Dies liegt vermutlich an der überwiegend freiwilligen Nutzung und der Verfügbarkeit konventioneller Firmen-Pkw im Bedarfsfall bei 9 von 10 Poolfahrzeugnutzern.

Neben Umweltschutzaspekten verbinden viele Poolnutzer auch Spaß mit der Nutzung des Elektroautos. So stimmen 55% der Aussage „Die Nutzung des Elektroautos macht Spaß“ uneingeschränkt zu. Bei den ebenfalls im Rahmen des Vorhabens befragten User Choosern mit Elektro-Dienstwagen waren es mit 80% allerdings noch einmal deutlich mehr. Elektroautos sprechen die befragten Poolnutzer offensichtlich auch auf der emotionalen Ebene an. Das Elektroauto ermöglicht den Teilnehmern eine Form von individueller Mobilität, die Vernunft (Umweltschutz) mit Spaß an neuartiger Hochtechnologie und „Freude am

Fahren“ vereint. Der Effekt ist aber im Vergleich mit der Auskunftsgruppe User Chooser deutlich schwächer.

Nutzungsprofil

Abbildung 77 zeigt die Tageskilometerfahrleistung mit den Elektroautos (t_1) im Vergleich mit den zuvor genutzten Firmen-Pkw (t_0):

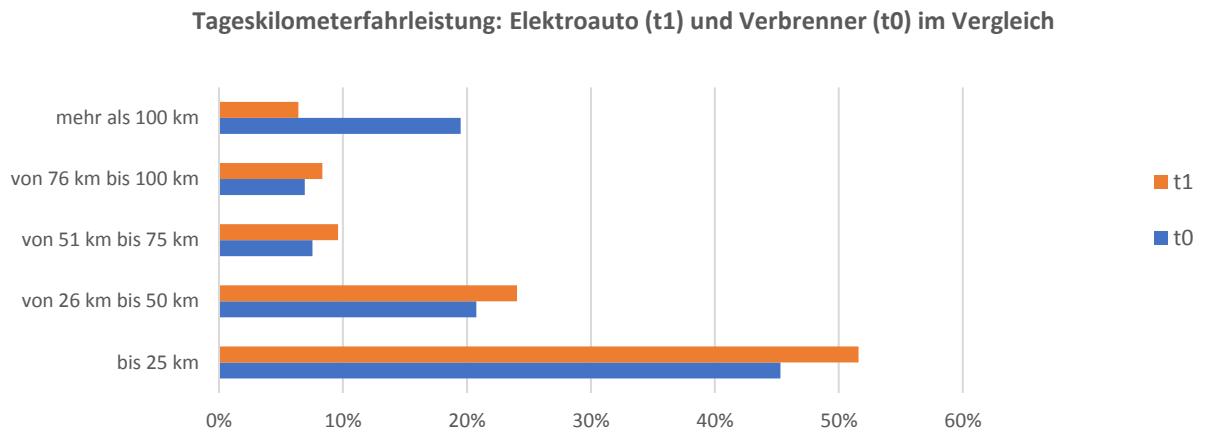


Abbildung 77: Tageskilometerfahrleistung: Elektroauto (t1) und Verbrenner (t0) im Vergleich, Befragungszeitpunkt: t_0/t_1; $n_N = 312$.

Sowohl mit Verbrenner-Pkw als auch mit Elektroautos werden überwiegend Kilometerleistungen bis max. 50 km am Tag zurückgelegt. Die durchschnittliche Tagesfahrleistung mit den Elektroautos ist im Vergleich mit den konventionellen Firmen-Pkw statistisch signifikant niedriger (p-Wert: 0,000). Dies betrifft beinahe ausschließlich Fahrleistungen über 100 km. Wurden mit Verbrenner-Pkw von 19% der befragten Poolnutzer durchschnittlich pro Tag mehr als 100 km zurückgelegt, ist dies mit dem Elektroauto nur noch bei 6% der Fall. Vermutlich wird für längere Fahrtstrecken auf alternative Verkehrsmittel zurückgegriffen, da sich der Mobilitätsbedarf in wenigen Monaten nur wenig verändert haben dürfte. Immerhin steht 91% der Auskunftspersonen im Bedarfsfall auch ein konventioneller Firmen-Pkw zur Verfügung.

Vergleicht man Nutzer eines reinelektrischen BMW i3 BEV mit denen des Range Extender-Modells REX erhält man das in Abbildung 78 dargestellte Ergebnis.

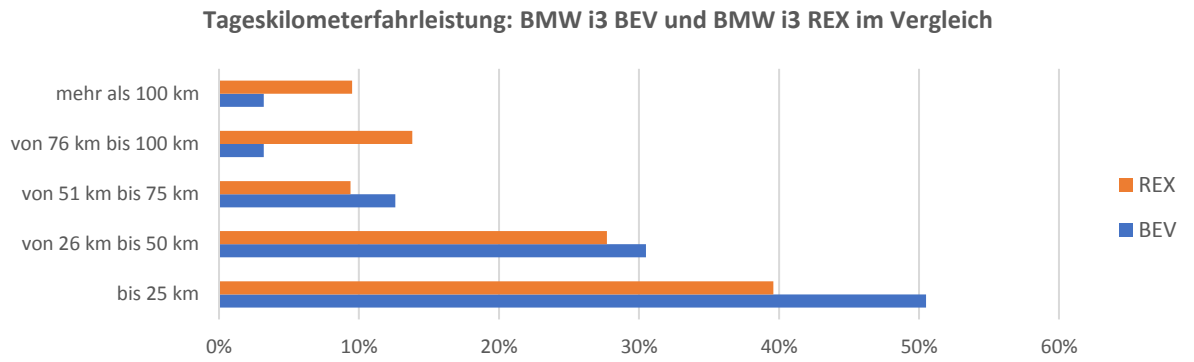


Abbildung 78: Tageskilometerfahrleistung: BMW i3 BEV und BMW i3 REX im Vergleich, Befragungszeitpunkt: $t_1; n_N(t_1) = 320$.

Die durchschnittliche Tageskilometerfahrleistung unterscheidet sich bei der reinelektrischen Version des BMW und dem Range Extender-Modell statistisch signifikant voneinander (p-Wert: 0,002). Der Kurzstreckenanteil liegt beim reinelektrischen Modell deutlich höher. Der Anteil von Poolnutzern, die im Durchschnitt mehr als 75 km am Tag mit dem BMW i3 zurücklegen, ist bei der Range Extender-Version mit 24% 4 mal so hoch wie beim reinelektrischen Modell (6%). Da die Differenz in der Kategorie „76 bis 100 km“ maximal ist, ermöglicht es der Range Extender offensichtlich zuallererst die reinelektrische Reichweite besser auszureizen. Der Anteil einfacher Streckenlängen zwischen 5 und unter 50 km beträgt mit den Elektroautos im Mittel über alle Teilnehmer 51% an allen Fahrten, die mit den Elektroautos unternommen werden. Berücksichtigt man die real verfügbaren Reichweiten von 120 bis 130 km nach Vollladung beim BMW i3 als dominantes Modell in der Stichprobe, ergibt sich damit der Weg hin und zurück plus Sicherheitspuffer für unvorhersehbare Ereignisse (Stau, Sperrungen etc.) und besondere Umweltbedingungen (Kälte) von 10 bis 40 km. Im Vergleich mit den Verbrenner-Modellen (t_0) nimmt der Fahrtenanteil mit einfachen Streckenlängen von 100 km von 14% auf 4% ab, während folgerichtig der Fahrtenanteil bis unter 5 km zunimmt.

In Abbildung 79 werden die Fahrtzwecke der Poolnutzer aufgezählt.

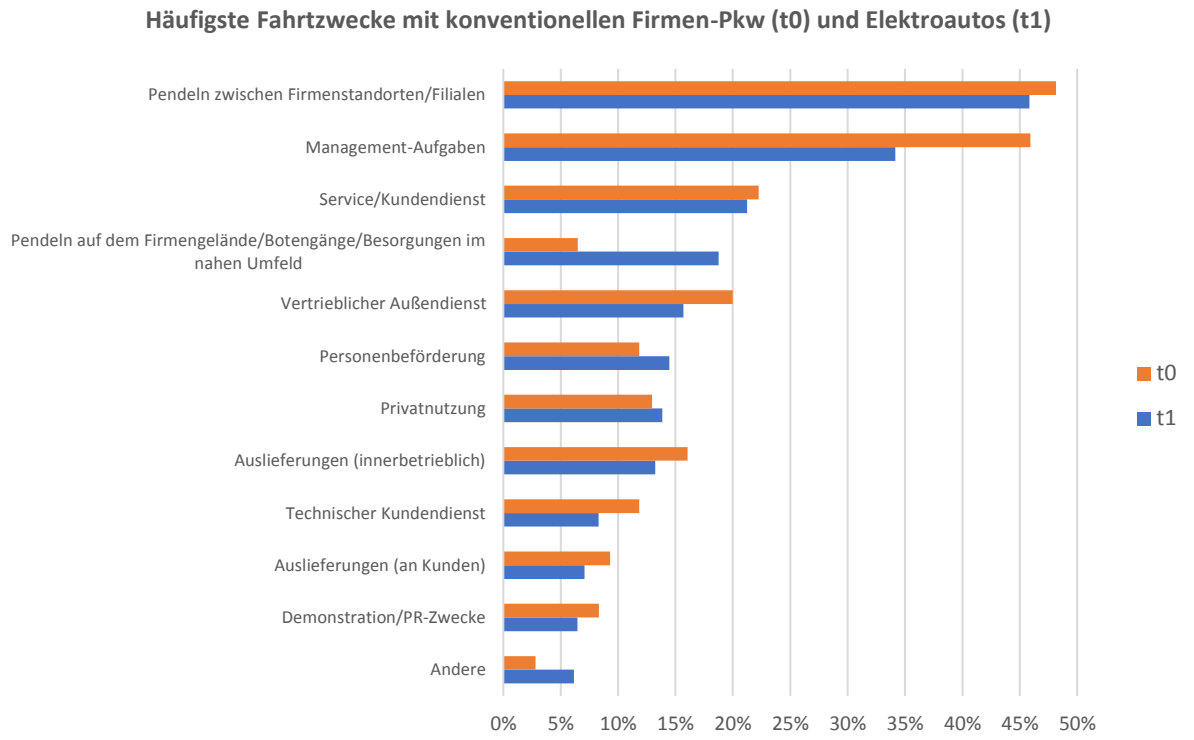


Abbildung 79: Häufigste Fahrtzwecke mit konventionellen Firmen-Pkw (t0) und Elektroautos (t1), Befragungszeitpunkt: t_0/t_1; $n_N = 326$.

Die Abfrage der drei häufigsten Fahrtzwecke mit Firmen-Pkw ergibt Folgendes: Die beiden am häufigsten genannten Fahrtzwecke mit konventionellen Firmen-Pkw (t_0) bleiben auch die häufigsten beiden Nennungen bei den Elektroautos (t_1). Der Fahrtzweck „Vertrieblicher Außendienst“ wird seltener unter den drei häufigsten Fahrtzwecken genannt (20% vs. 16%). Ein Grund dafür konnte sein, dass der vertriebliche Außendienst in der Regel auch längere Fahrtstrecken abdeckt, die mit Elektroautos aus bekannten Gründen eher vermieden werden. Viel deutlicher zeigt sich der Effekt beim zweiten Langstreckenfahrtzweck „Management-Aufgaben“ (46% vs. 34%). Dagegen steigt der Anteil der Kurzstreckenkategorie „Pendeln auf dem Firmengelände/Botengänge/etc. unter den drei häufigsten Fahrtzwecken von 6,5% auf 19% stark an. Elektroautos werden tatsächlich viel häufiger auf dem Firmengelände und im nahen Umfeld eingesetzt.

Insgesamt fällt das Urteil der Poolnutzer zur Eignung der Elektroautos für ihre häufigsten Fahrtzwecke gut bis sehr gut aus. 21% der 45 befragten Poolnutzer, die Privatnutzung als einen ihrer drei häufigsten Fahrtzwecke mit den Elektroautos nennen, bewerten die Eignung des Elektroautos hierfür allerdings als eher nicht, weitgehend nicht oder gar nicht geeignet. Vor dem Hintergrund von Urlaubsreisen und längeren Ausflügen ist der Anteil trotzdem überraschend niedrig. Ebenfalls relativ „kritisch“ wird die Eignung für den vertrieblichen Außendienst (für 14% eher nicht, weitgehend nicht oder gar nicht geeignet) und innerbetriebliche Auslieferungen (für 14% eher nicht geeignet) eingeschätzt. Hier dürfte einerseits die eingeschränkte Reichweite und lückenhafte Ladeinfrastruktur und andererseits die Dominanz des BMW i3 als

kompakter Pkw (eingeschränkter Laderaum) das Antwortverhalten negativ beeinflussen. Auffällig ist, dass 64% von 149 Poolnutzern ihr Elektroauto für das Pendeln zwischen Firmenstandorten/Filialen als völlig geeignet beurteilen. Einerseits sind die Streckenlängen hier tendenziell kurz oder sehr kurz, andererseits besteht eine relative Sicherheit am Zielort ohne Probleme aufladen zu können, schließlich liegt der in „eigenem Gebiet".

Wie Abbildung 80 zeigt, entscheiden im Wesentlichen drei Aspekte darüber, ob ein Elektroauto für eine anstehende Dienstfahrt genutzt wird oder nicht.

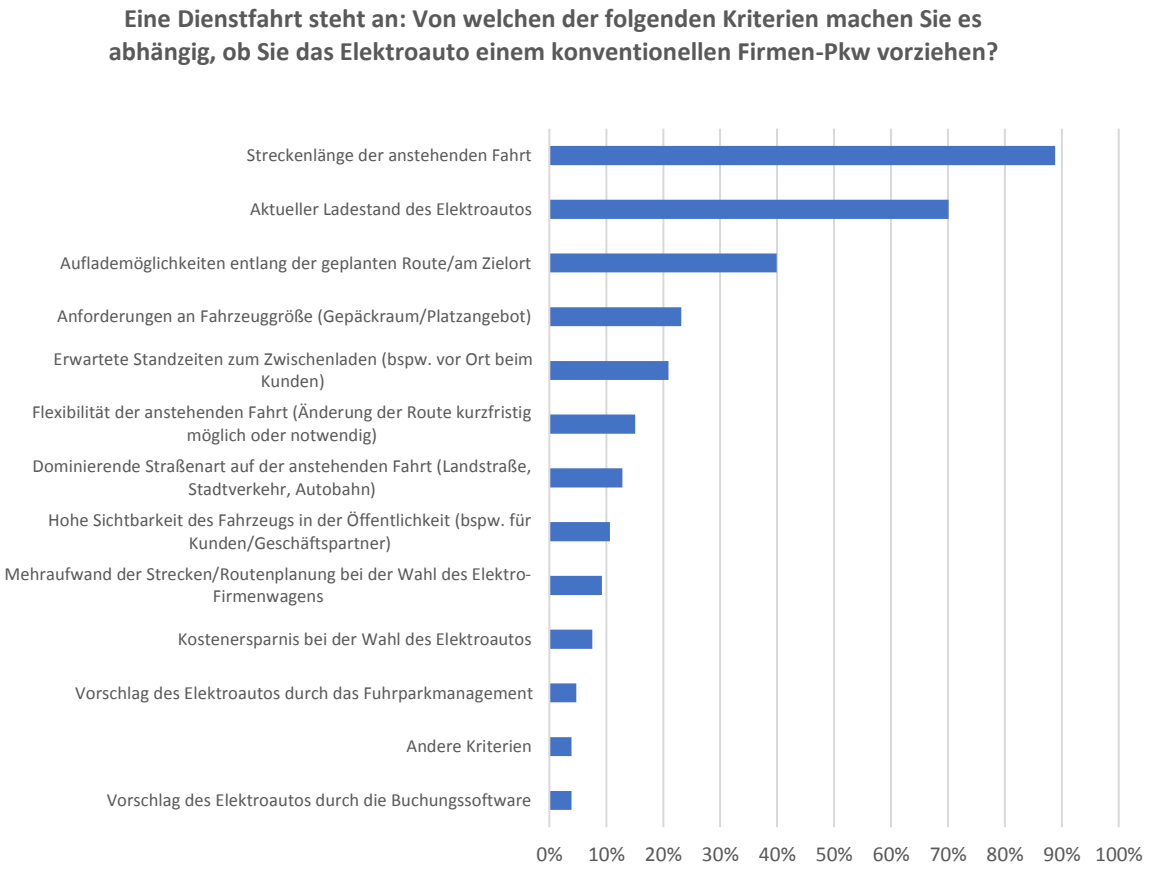


Abbildung 80: Überlegungen, bevor eine Dienstfahrt mit dem Elektroauto gestartet wird, Befragungszeitpunkt: t_0; $n_N(t_0) = 358$.

Stehen sowohl ein konventioneller Firmen-Pkw, als auch ein Elektroauto für eine anstehende Fahrt zur Verfügung, machen es die befragten Poolnutzer vor allem von der Streckenlänge der anstehenden Fahrt (89%), dem aktuellen Ladestand (70%) und der Verfügbarkeit von Aufladeмöglichkeiten entlang der geplanten Route/oder am Zielort (40%) abhängig, ob sie mit einem Elektroauto aufbrechen oder auf einen konventionellen Firmen-Pkw vertrauen. Damit entscheidet ein Dreiklang aus verfügbarer Reichweite des Fahrzeugs, der öffentlicher Ladeinfrastruktur und der geplanten Streckenlänge, ob ein Elektroauto genutzt wird oder nicht.

Vor- und Nachteile

Abbildung 81 zeigt die wahrgenommenen Vorteile eines Elektroautos gegenüber einem konventionellen Pkw.

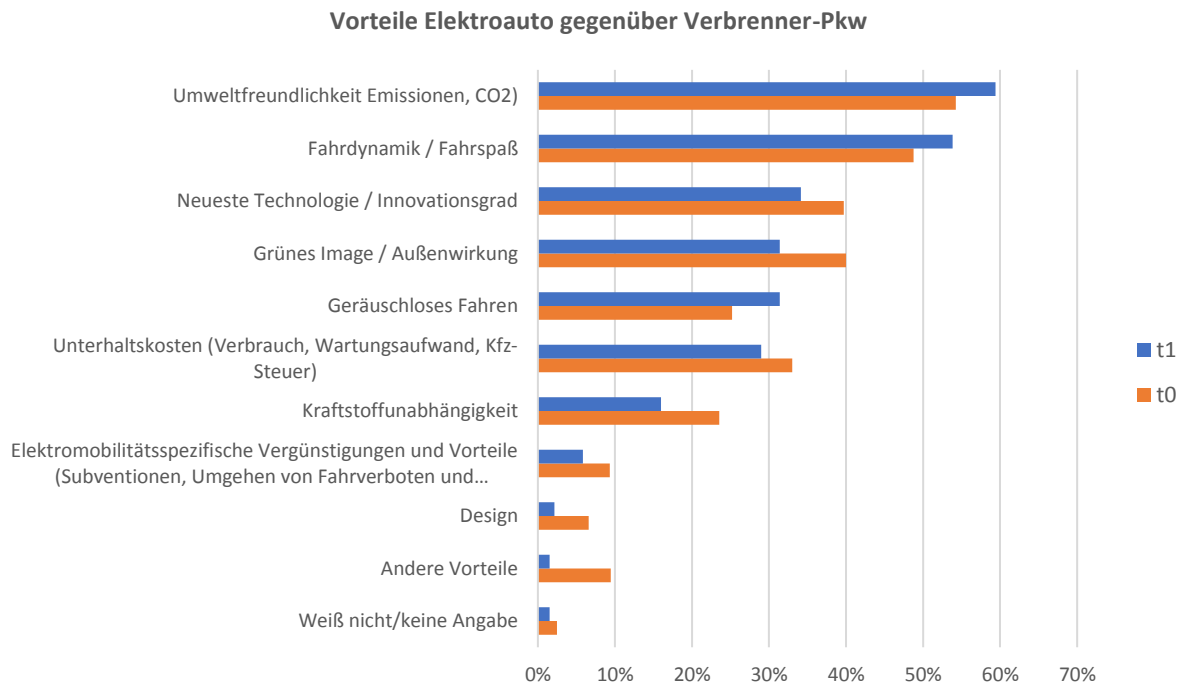


Abbildung 81: Vorteile Elektroauto gegenüber Verbrenner-Pkw, Befragungszeitpunkt: t_0/t_1; $n_N = 326$.

Unter den drei wichtigsten Vorteilen von Elektroautos werden von den befragten Poolnutzern am häufigsten Umweltfreundlichkeit (59%) und Fahrspaß/Fahrdynamik (54%) genannt. Die Wichtigkeit des Vorteils Neuste Technologie/Innovationsgrad nimmt im Zeitablauf deutlich ab (t_0: 40%; t_1: 34%). Auch der Aspekt Kraftstoffunabhängigkeit wird nach 7-9-monatiger Nutzung deutlich seltener zu den wichtigsten drei Vorteilen der Elektroautos gezählt (t_0: 24%; t_1: 16%).

Das Fahren eines Elektroautos gibt den meisten befragten Poolnutzern (82%) ein gutes Gewissen. 79% der Teilnehmer stimmen der Aussage zu, dass sich ihre persönliche CO_2-Bilanz durch das Elektroauto verbessert. Trotzdem geben die Teilnehmer ein eher differenziertes Urteil zur Umwelt-Gesamtbilanz von der Produktion bis zur Verwertung ab. Für immerhin 44% sind Elektroautos bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus nicht umweltfreundlicher als konventionelle Verbrennerfahrzeuge. Die negativen Umweltwirkungen der Herstellung und des Recyclings von Batterien sowie der Stromerzeugung sind vielen Poolnutzern offenbar bewusst. Zwar sehen die befragten Poolnutzer in der Umweltfreundlichkeit einen wichtigen Vorteil von Elektroautos gegenüber konventionellen Verbrenner-Pkw, allerdings stimmen nur 5% der Aussage uneingeschränkt zu, dass Elektroautos auch ohne grünen Strom umweltfreundlich genug sind. 29% lehnen die Aussage dagegen völlig ab, weitere 14% lehnen sie weitgehend ab. 35% stimmen der Aussage uneingeschränkt zu, dass ihnen zum Laden der Elektroautos grüner Strom wichtig ist, nur 6%

lehnen die Aussage völlig ab. 26% stimmen völlig der Aussage zu, dass Elektroautos nur mit grünem Strom gefahren werden sollten, 9% lehnen die Aussage dagegen völlig ab.

Fast jeder dritte befragte Poolnutzer (31%) nennt Image/Außenwirkung als einen der drei wichtigsten Vorteile von Elektroautos. Drei von vier Teilnehmern (76%) geben an, dass sie während der 7 bis 9-monatigen Nutzung von Kunden oder Geschäftspartnern auf das Elektroauto mehr oder weniger häufig angesprochen wurden. Folgerichtig stimmen 60% der befragten Poolnutzer der Aussage völlig oder weitgehend zu, dass ihr Elektroauto das Ansehen der Firma positiv beeinflusst.

Analog zu den wahrgenommenen Vorteilen werden nun die Nachteile des Elektroautos in Abbildung 82 dargestellt:

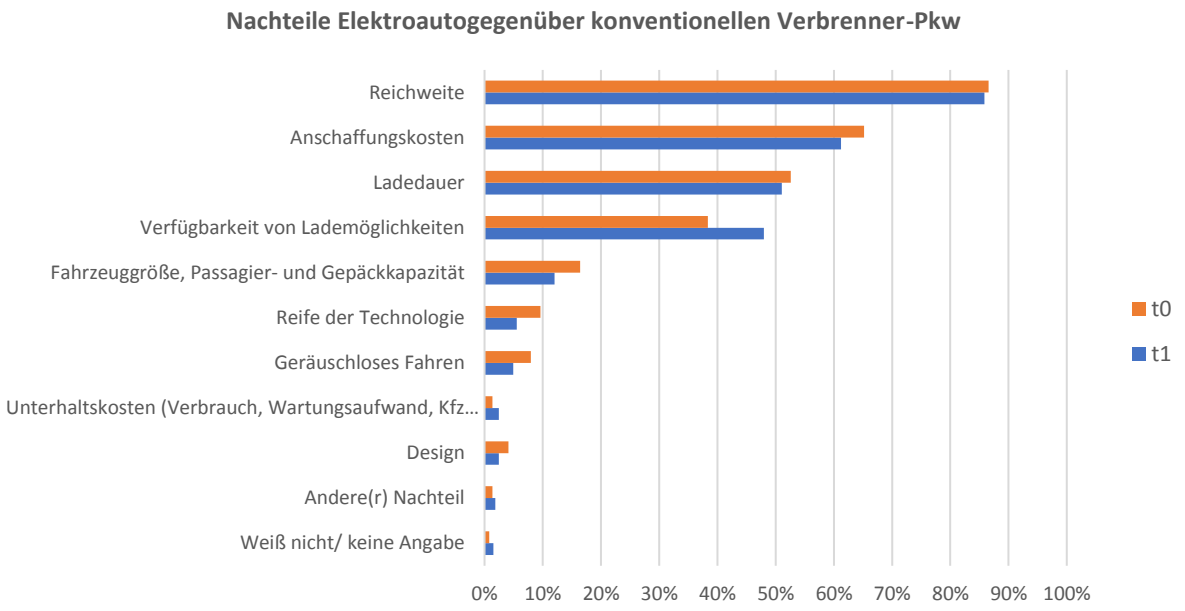


Abbildung 82: Nachteile Elektroauto gegenüber konventionellen Verbrenner-Pkw, Befragungszeitpunkt: t_0/t_1; $n_N = 326$.

Die Ergebnisse zeigen eine Konzentration der wahrgenommenen Nachteile auf 4 alte Bekannte:

- Reichweite (86%),
- Anschaffungskosten (61%),
- Ladedauer (51%),
- Verfügbarkeit von Lademöglichkeiten (48%).

Interessanterweise wird der Nachteil „Verfügbarkeit von Lademöglichkeiten“ nach mehrmonatiger Nutzung von 48% der Teilnehmer unter die drei wichtigsten Nachteile gefasst. Am Beginn der Nutzung waren es nur 38%. Ansonsten erweisen sich die wahrgenommenen Nachteile als unabhängig vom Erfahrungsstand der Poolnutzer.

27% stimmen der Aussage „Die Reichweite ist ausreichend für meinen Berufsalltag“ völlig zu, weitere 33% stimmen weitgehend und 21% stimmen eher zu (Summe: 81%). Die Platzierung der Elektroautos durch das Fuhrparkmanagement scheint überwiegend im Einklang mit den Reichweitenbedürfnissen der Poolfahrzeugnutzer an die Reichweite erfolgt zu sein. Allerdings stimmen 10% der Aussage „Ich fühle mich durch die Reichweite in meinem Aktionsradius eingeschränkt.“ uneingeschränkt zu, immerhin 19% weitgehend und 26% eher (Summe: 55%). Nur 18% fühlen sich im eigenen Aktionsradius gar nicht eingeschränkt. Wegen der Reichweite während der Fahrt oftmals besorgt sind tendenziell 34%. Etwa zwei Drittel (64%) lehnen die zugehörige Aussage dagegen völlig oder weitgehend ab. Dieser Wert liegt höher, als bei den ebenfalls befragten User Choosern mit Elektro-Dienstwagen (49%).

In Abbildung 83 wird eine Forschungsfrage bezüglich des Umgangs mit Reichweiten noch einmal genauer analysiert.

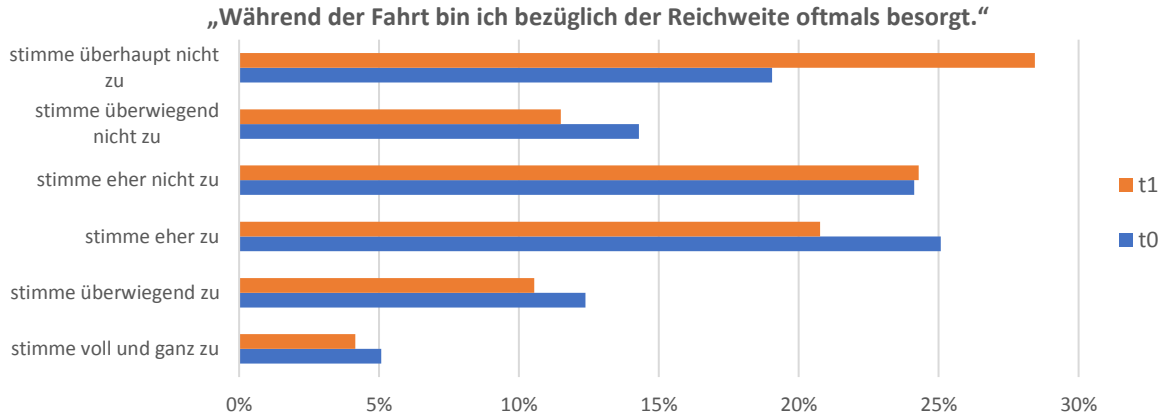


Abbildung 83: Reichweitenangst, Befragungszeitpunkt: t_0/t_1; $n_N = 315$.

Die Sorge bezüglich der Reichweite während der Fahrt nimmt zwischen der Erst- (t_0) und der Zweitbefragung (t_1) statistisch signifikant ab (p-Wert: 0,013). Das heißt mit zunehmender Fahrerfahrung verlieren etwaige Befürchtungen und Ängste, dass nicht mehr genügend Reichweite zur Verfügung steht um das Fahrtziel zu erreichen, signifikant an Bedeutung. Gründe dafür könnten Gewöhnungs- bzw. Lerneffekte sein, die mit der mehrmonatigen Nutzung der Elektroautos eintreten.

Zufriedenheit

Abbildung 84 zeigt die globale Zufriedenheit der Poolnutzer mit ihrem jeweiligen Elektroauto Modell.

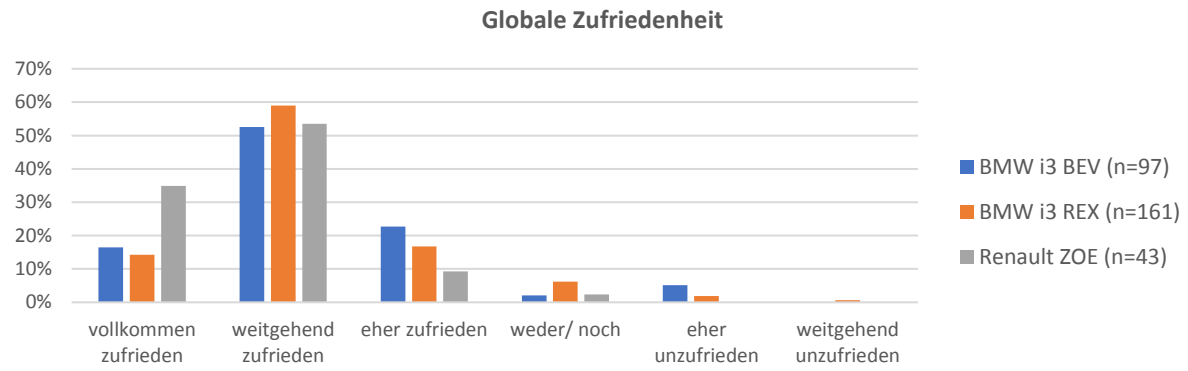


Abbildung 84: Globale Zufriedenheit, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_N(t_1) = n$.

74% der befragten 325 Poolnutzer sind mit ihrem Elektroauto vollkommen (18%) oder weitgehend zufrieden (56%). 59 Teilnehmer (18%) geben an eher zufrieden zu sein, 14 Teilnehmer geben mit „weder/noch“ ein neutrales Urteil ab. 8 Teilnehmer sind mit ihrem Elektroauto eher unzufrieden und ein Teilnehmer ist weitgehend unzufrieden. Insgesamt herrscht ein hohes Zufriedenheitsniveau.

Es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen der Zufriedenheit von BMW i3 REX- und BMW i3 BEV-Poolnutzern. Vergleicht man die globale Zufriedenheit der Renault ZOE-Nutzer mit derjenigen von BMW i3-Nutzer wird deutlich, dass die ZOE-Nutzer signifikant zufriedener mit ihrem Elektroauto sind (p-Wert: 0,005). Die Themen Reichweite, Ladeinfrastruktur und Ladedauer formen gemeinsam das Konstrukt Alltagstauglichkeit. 43% der Renault ZOE-Nutzer sind mit der Alltagstauglichkeit vollkommen zufrieden, bei den BMW i3-Modellen sind es nur jeweils 12%. Entscheidend für die Differenz ist an dieser Stelle allerdings weniger das jeweilige Modell, sondern das dominierende Nutzungsprofil. Die ZOE werden überwiegend auf einem großen Betriebsgelände mit betriebseigener Ladeinfrastruktur bewegt. Daneben werden häufig andere, in der Nähe liegende Betriebsstätten angefahren. Somit werden längere Strecken und das Laden an „fremden“ Ladensäulen überwiegend vermieden. Überraschenderweise erhält der BMW i3 REX kein signifikant besseres Urteil bei der Alltagstauglichkeit als das reinelektrische Modell BEV.

Mobilitätsurteil

81% der befragten Poolnutzer sehen ihre Mobilitätsanforderungen im Berufsalltag durch das Elektroauto erfüllt. Darunter geben 30% an, dass dies weitgehend der Fall ist, 32% stimmen der Aussage sogar uneingeschränkt zu. Nur 10 von 326 befragten Poolnutzern sehen ihre täglichen Mobilitätsanforderungen durch das Elektroauto überhaupt nicht erfüllt, bei weiteren 17 bzw. 32 Teilnehmern ist dies ebenfalls eher bzw. weitgehend nicht der Fall (Summe: 18%). 10% sagen, dass das Elektroauto ihre Arbeitsleistung negativ beeinflusst. Problematisch wird es vor allem bei Fahrten außerhalb der maximalen Reichweite. 64% stimmen der Aussage „Mit dem Elektroauto sind Fahrten außerhalb der maximalen Reichweite umständlich.“ völlig zu, 23% weitgehend.

Die Bewertung der Flexibilität mit dem Elektroauto wird in Abbildung 85 präsentiert.

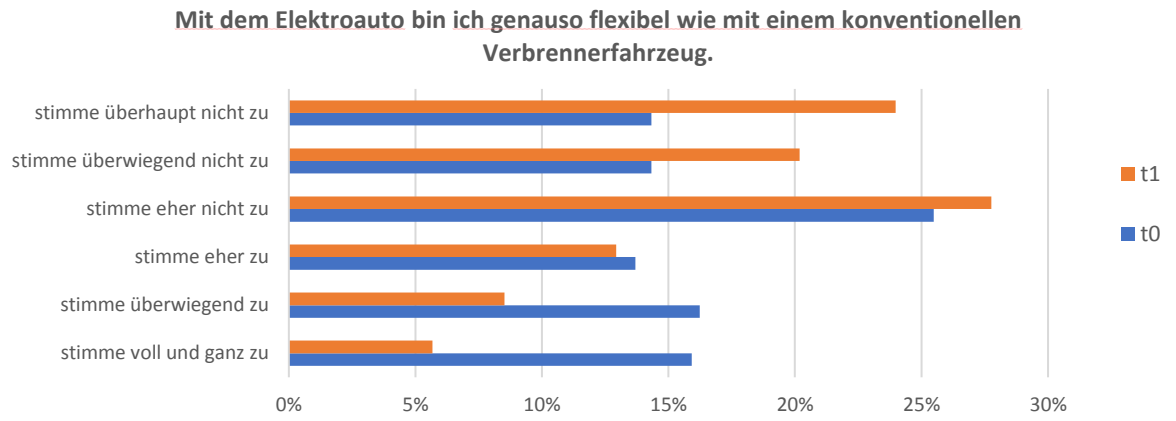


Abbildung 85: Flexibilitätsurteil, Befragungszeitpunkt: t_0/t_1; $n_N = 326$.

Den wichtigsten Nachteil der Elektroautos stellt auch aus Sicht der Poolfahrzeugnutzer deren eingeschränkte Flexibilität dar. 24% stimmen der Aussage „Mit meinem Elektroauto bin ich genauso flexibel wie mit einem konventionellen Verbrennerfahrzeug.“ gar nicht zu, 20% überwiegend nicht und 28% eher nicht (Summe: 72%). Das Flexibilitätsurteil wird dabei mit zunehmender Fahrerfahrung signifikant kritischer (p-Wert: 0,000). Hier muss von enttäuschten Erwartungen nach mehrmonatiger Nutzung im Fahrzeugpool ausgegangen werden.

Wie die Flexibilität mit Elektroautos aus Sicht der Poolnutzer verbessert werden könnte, illustriert Abbildung 86.

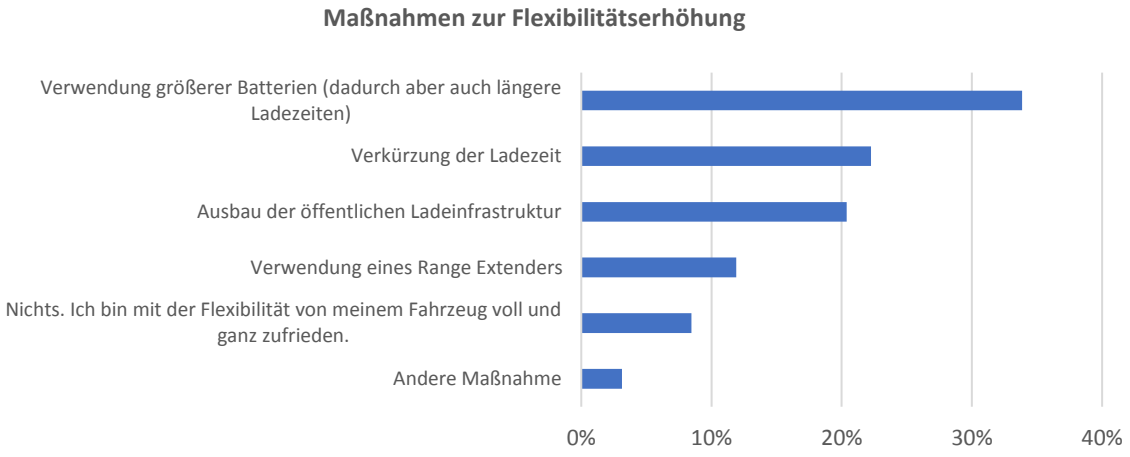


Abbildung 86: Maßnahmen zur Flexibilitätserhöhung, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_N(t_1) = 319$.

Hier wird erneut die Unzufriedenheit mit der Flexibilität deutlich: Lediglich 8% der befragten Poolnutzer geben an, mit der Flexibilität ihres Elektroautos voll und ganz zufrieden zu sein. Als effektivste Maßnahme zur Erhöhung der Flexibilität sieht eine relative Mehrheit (34%) die Verwendung größerer Batterien, auch wenn die Ladezeiten dadurch zunehmen würden. 22% sehen dagegen in der Verkürzung der Ladezeit

die effektivste Maßnahme zur Verbesserung der Flexibilität. Jeder fünfte befragte Poolnutzer gibt an wegen Reichweitenproblemen oder Ladestopps gelegentlich (19%) oder häufig (1%) Termine verschieben oder ganz ausfallen lassen zu müssen. Nur 8 Poolnutzer wurden wegen Reichweitenproblemen mindestens einmal abgeschleppt. Trotzdem sieht jeder Zehnte (10%) seine Arbeitsleistung durch das Elektroauto eingeschränkt.

Abbildung 87 stellt den Anteil der mit dem Elektroauto abdeckbaren Fahrten im Längsschnitt dar.

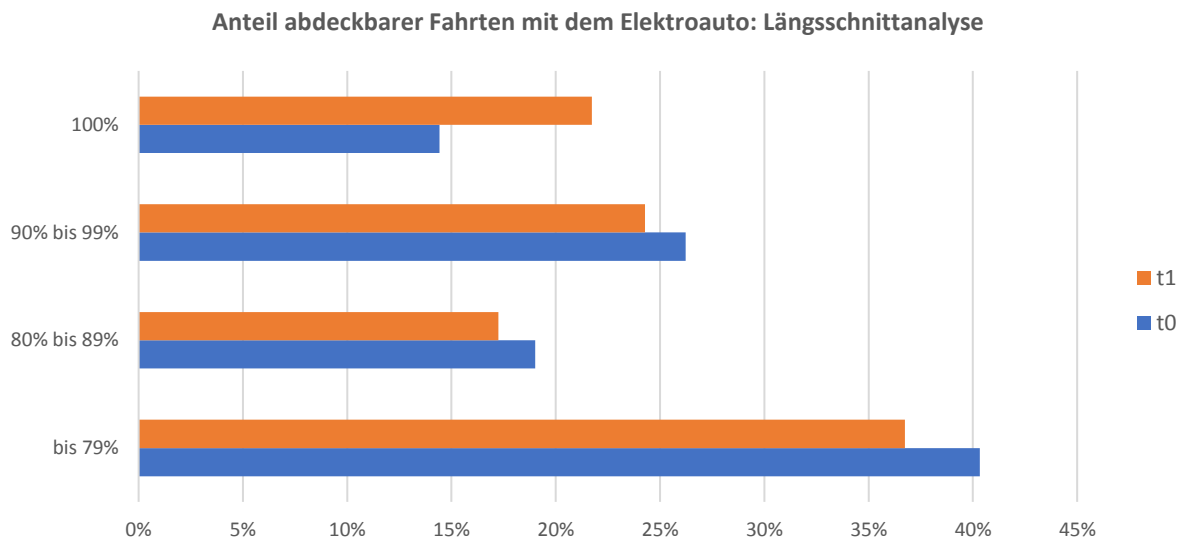


Abbildung 87: Anteil abdeckbarer Fahrten mit dem Elektroauto: Längsschnittanalyse, Befragungszeitpunkt: t_0/t_1; $n_N = 313$.

22% der befragten Poolnutzer geben nach mehrmonatiger Nutzung an, dass sie alle ihre Fahrten im Berufsalltag mit dem Elektroauto abdecken könnten. Etwa die Hälfte meint mehr als 80% abdecken zu können. Wie der durchgeführte T-Test beweist, steigt der geschätzte Anteil der Fahrten im Berufsalltag, der allein mit Elektroautos zu bewältigen ist, im Zeitablauf statistisch signifikant an (p-Wert: 0,000). Mit zunehmender Fahrerfahrung sind die befragten Poolnutzer davon überzeugt, häufiger auf einen Verbrenner-Pkw im Berufsalltag verzichten zu können. Eine 100% Abdeckung erreicht aber nach eigenen Angaben nur jeder fünfte Poolnutzer.

Zum Thema optimale Reichweiten wurden diese auch für die Flottennutzer mittels der van Westendorp Methode erhoben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 88 illustriert.

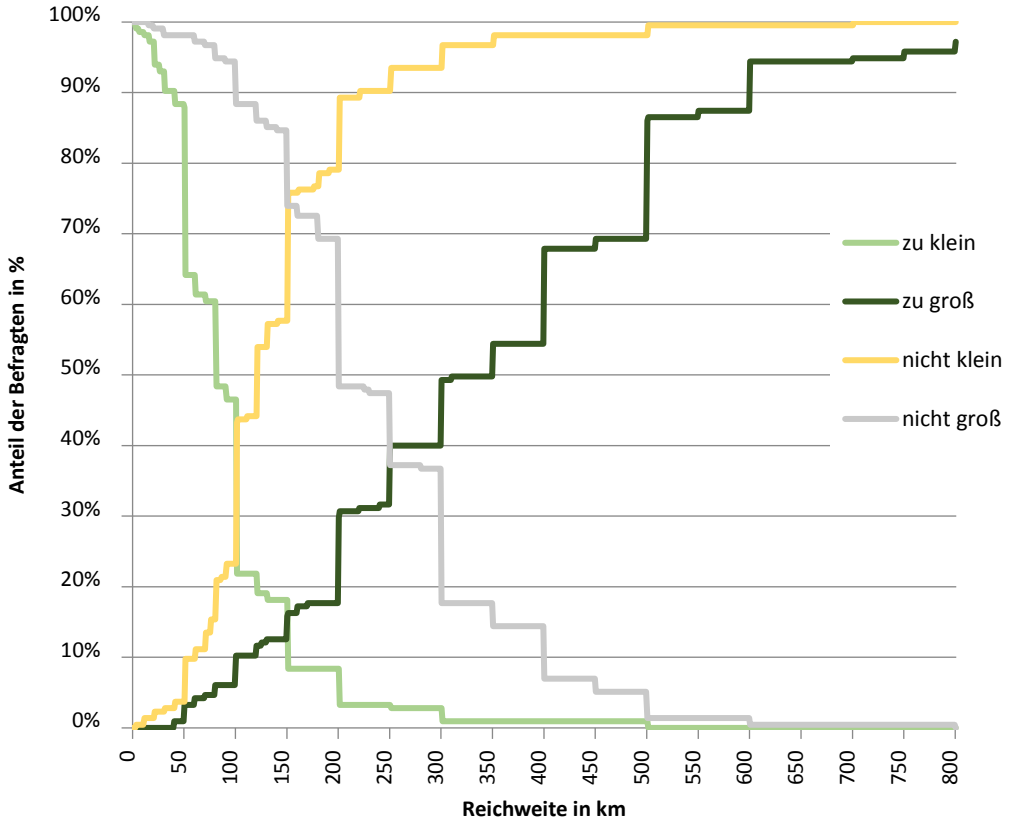


Abbildung 88: Van Westendorp Reichweiten Flottennutzer, Befragungszeitpunk: t_1; $n_N(t_1) = 215$.

Die optimale ermittelte Reichweite für Flottennutzer liegt bei 152 km. Den Rahmen für akzeptable Reichweiten bilden 102 km und 250 km, um die Elektroauto effizient im Arbeitsalltag einsetzen zu können.

Haben die befragten Poolnutzer ihr Elektroauto einmal nicht für eine anstehende Fahrt genutzt, geschah dies überwiegend wegen einer zu geringen verfügbaren Reichweite (57%) oder weil das Fahrzeug schon verbucht war (46%). Eine eingeschränkte Gepäckraum-/Transportkapazität wird von 18% befragten Poolnutzern unter den Gründen der Nichtnutzung genannt, eine eingeschränkte Passagierkapazität von 7% (Summe: 25%). Jeder Zehnte (10%) gibt an, dass er das Elektroauto tatsächlich für alle anstehenden Fahrten im Berufsalltag nutzen konnte. Immerhin 48% der befragten 300 Poolnutzer geben an, dass es Fahrten im Berufsalltag gibt, die sie gerne mit ihrem Elektroauto erfüllen würden, es aber nicht können. Am häufigsten werden Strecken außerhalb der verfügbaren Reichweiten genannt (81 mal), daneben werden explizit Fahrten mit dem Fahrtzweck Außendienst häufiger genannt (33 mal), was in dieselbe Richtung zielt. Es sind vor allem Fahrten mit längeren Fahrtstrecken, bei denen ungewollt auf Alternativen umgestiegen wird.

Range Extender

Abbildung 89 sind die Angaben der Poolnutzer mit Range Extender-Modell zu den Anteilen der reinelektrischen Fahrten dargestellt.

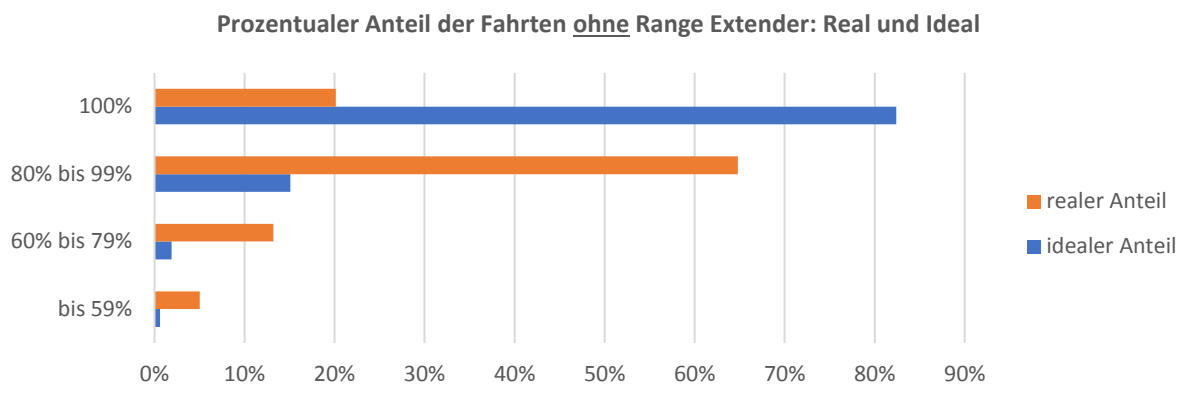


Abbildung 89: Prozentualer Anteil der Fahrten ohne Range Extender: Real und Ideal, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_N(t_1) = 159$.

Der Vergleich des erwünschten mit dem realen Anteil der Fahrten mit Verbrennungsmotorunterstützung macht deutlich, dass die befragten 159 Poolnutzer gerne noch häufiger rein elektrisch unterwegs wären. 97% würden gerne mindestens 8 von 10 Fahrten ohne Zuschaltung des Range Extenders absolvieren. Während der mehrmonatigen Nutzung gelang dies aber nur 85% der Teilnehmer. 8 von 10 Poolnutzern (82%) geben an, am liebsten bei allen Fahrten auf den Range Extender zu verzichten. Für die große Mehrheit Poolnutzer stellt das Konzept also nur eine Notlösung dar, solange keine für sie adäquaten reinelektrischen Reichweiten möglich sind.

Jeder fünfte (19%) befragte Poolnutzer stimmt der Aussage „Die Reichweitenreserve durch den Range Extender ist ausreichend“ uneingeschränkt zu. Weitere 29% stimmen weitgehend zu, 26% stimmen noch eher zu (Summe: 74%). Insgesamt 26% stimmen dieser Aussage eher nicht, weitgehend nicht oder gar nicht zu. Aber nur 2% halten die Reichweitenreserve für gar nicht ausreichend. „Es ist mir wichtig, den Range Extender manuell zu- und abschalten zu können“. Insgesamt 61% stimmen der Aussage „Es ist mir wichtig, den Range Extender manuell zu- und abschalten zu können.“ zu, darunter stimmt jeder Vierte (26%) völlig zu.

Ladeverhalten

In Abbildung 90 werden die den Poolnutzern wichtigsten Ladeorte einsortiert.

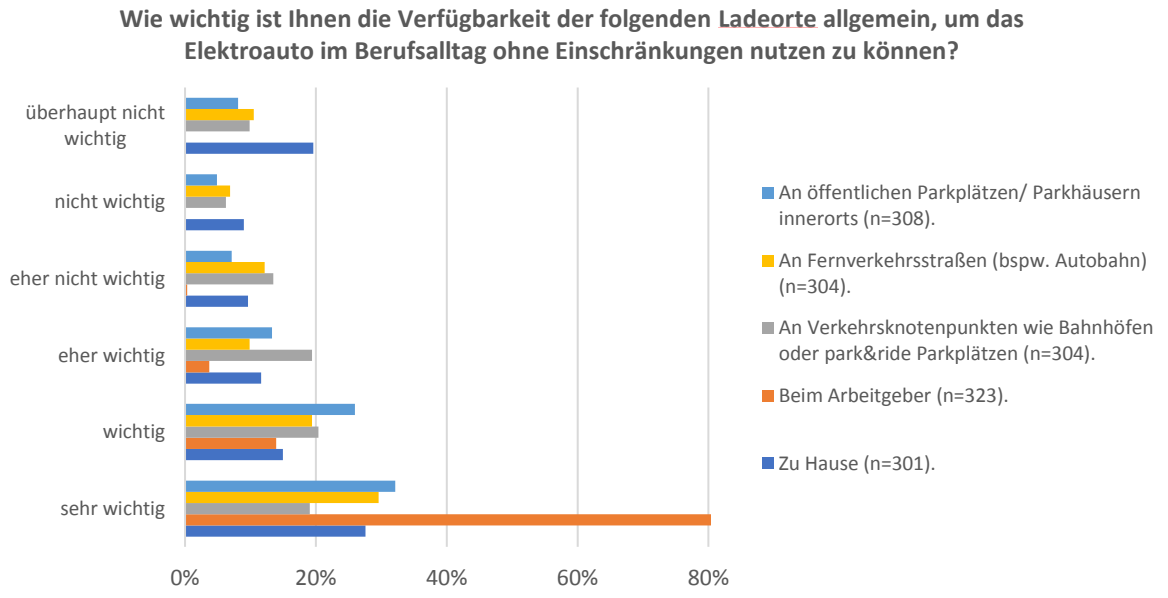


Abbildung 90: Wichtigkeit Ladeorte, Befragungszeitpunkt: t_1; $n_N(t_1) = 326$-

Den befragten Poolnutzern ist, wenig überraschend, das Laden in der Firma (80%) mehrheitlich sehr wichtig. Beinahe alle befragten Poolnutzer (95%) nennen „in der Firma“ unter den Orten, an denen sie das Elektroauto üblicherweise aufladen. Es gibt ein gespaltenes Urteil beim Thema Heimladen. Das private Laden von Elektroautos aus dem Firmen-Pool halten 28% für sehr wichtig, dagegen halten 20% es für überhaupt nicht wichtig. Immerhin 13% geben „zu Hause“ unter ihren üblichen Ladeorten an. Nur 10% laden üblicherweise (auch) an einer öffentlichen Ladesäule, jedoch sind zwischen 60% und 70% der Meinung, dass Ladesäulen im öffentlichen Raum eher wichtig oder sogar sehr wichtig sind, um das Elektroauto im Berufsalltag ohne Einschränkung nutzen zu können. Verkehrsknotenpunkte (Bahnhöfe, Park&Ride-Parkplätze) werden als Ladeorte von 3 von 10 Befragten (30%) als eher nicht wichtig, nicht wichtig, oder überhaupt nicht wichtig beurteilt. Keiner der Ladeorte wird aber mehrheitlich als unwichtig bewertet.

Nur in seltenen Fällen übernehmen die Poolnutzer keine aktive Funktion beim Nachladen der Elektroautos: 90% geben an, dass sie das Elektroauto während der mehrmonatigen Nutzung des Öfteren selbst geladen haben. Die Mehrheit der befragten Poolnutzer (67%) lädt üblicherweise unabhängig vom Ladezustand immer nach Rückkehr von einer Fahrt an den angestammten Ladestationen im Betrieb. 28% entscheiden dagegen eher situationsabhängig. Sie laden üblicherweise erst auf, wenn der Ladestand auf ein bestimmtes Niveau abgesunken ist (16%), eine zu geringe Restreichweite für die nächste geplante Fahrtstrecke vermutet wird (9%), oder sie in der Nähe einer Lademöglichkeit sind (3%).

Das Urteil zum betrieblichen Laden umfasst mit einer Stichprobe von 271 Poolnutzern die größte Gruppe, da 95% der Teilnehmer nach eigenen Angaben dort üblicherweise die Elektroautos aufladen. In der Firma wird nach Aussage der befragten Poolnutzer am häufigsten eine Wallbox verwendet (44%) und etwa einem Viertel steht eine Ladesäule zur Verfügung. Sieben befragte Poolnutzer haben sogar das Privileg an einer DC-Schnelladesäule zu laden (Mitarbeiter von Energieversorgern, Forschungsinstituten u. a.). Immerhin noch 25% müssen auf eine Haushaltssteckdose zum Laden in der Firma zurückgreifen.

Aus den ermittelten hohen Zufriedenheitswerten wird deutlich, dass die Betriebe mit der Anschaffung des Elektroautos in der Regel auch in eine adäquate Ladeinfrastruktur investiert haben und die Planung dahingehend richtig waren. Die befragten 265 Poolnutzer sind mit der Zahl der Lademöglichkeiten und der Zuverlässigkeit des Ladevorgangs bis auf wenige Ausnahmen vollkommen, oder zumindest weitgehend zufrieden. Lediglich mit Fremdparkern scheint es in einigen Betrieben zu Problemen gekommen zu sein. Immerhin 52 der 248 befragten Poolnutzer geben ein indifferentes Urteil ab (weder/noch = 21%). Auch mit der Erreichbarkeit/Nähe zum Arbeitsplatz (91%) und dem Komfort bzw. der Handhabung des betrieblichen Ladens (75%) ist eine große Mehrheit der befragten Poolnutzer vollkommen oder zumindest weitgehend zufrieden. Anders sieht es mit der Ladegeschwindigkeit aus. 19% geben an hier eher unzufrieden zu sein, weitere 6% bzw. 4% sind weitgehend bzw. vollkommen unzufrieden (Summe: 29%). Das Ergebnis ist aufgrund der hohen Anteile von konventionellen Steckdosen (26%) und des nicht mehrphasigen Wechselstroms ladenden BMW i3 in der Stichprobe wenig verwunderlich.

Gesamturteil

81% der befragten Poolnutzer lehnen die Aussage „Ich bin von Elektroautos nicht überzeugt“ nach mehrmonatiger Nutzung ab. Darunter lehnen 44% die Aussage völlig ab, 19% lehnen die Aussage weitgehend ab. Beinahe alle empfinden bei der Nutzung des Elektroautos Fahrfreude (97%): 50% stimmen der Aussage uneingeschränkt zu, dass Elektroautos Fahrfreude vermitteln, 29% stimmen weitgehend zu, 17% stimmen noch eher zu. Etwa 67% stimmen der Aussage völlig (32%) oder weitgehend (34,5%) zu, dass Elektroautos für ihren Berufsalltag geeignet sind. Einem rein elektrischen Fuhrpark stehen die befragten Poolnutzer dagegen eher skeptisch gegenüber: 40% stimmen der Aussage völlig zu, dass Elektroautos als einzige Pkw im Fuhrpark der Firma nicht geeignet sind. Weitere 17% stimmen weitgehend und 14% eher zu (Summe: 71%). Es ist zu betonen, dass mit zunehmender Fahrerfahrung die Einstellung der befragten Poolnutzer sich nicht signifikant ändert.

Auch Poolnutzer können durch ihr Kommunikationsverhalten und „Mundpropaganda“ in den Bertrieben, aber auch im privaten Umfeld, wertvolle Hilfe für die Marktdurchdringung von Elektroautos leisten. Viele Poolnutzer haben sich in den 8 Wochen vor der Zweitbefragung nach eigenen Angaben häufiger als Change Agents betätigt. 37% stimmen der Aussage „Ich habe Anderen positiv über mein Elektroauto berichtet“ völlig zu, 32% stimmen weitgehend zu, 23% eher (Summe: 92%). Nur 25 von 326 Poolnutzern stimmen der Aussage „Ich habe Anderen meinen Ärger über mein Elektroauto mitgeteilt“ eher zu. Zwei Teilnehmer stimmen der Aussage völlig und 8 weitgehend zu. Negative Mundpropaganda hat während der mehrmonatigen Nutzung der Elektroautos demnach nur selten stattgefunden. 75 % der befragten

Poolnutzer beabsichtigen das Elektroauto in Zukunft regelmäßig zu nutzen. Nur 33 von 326 befragten Poolnutzern (10%) sind sich dagegen sicher, dass sie das Elektroauto aus verschiedenen Gründen nicht mehr nutzen werden.

3.1.17 AP 4550 Abgleichs der Messdaten mit den subjektiven Daten aus den Nutzerbefragungen

Neben der Erhebung von subjektiven Daten durch Befragungen in Telefoninterviews und Online-Fragebögen wurden in einer Auswahl von Projektfahrzeugen sensorbasierte Datenlogger verbaut, um während der Nutzungsdauer objektive Fahrdaten erheben zu können (AP 5000). Damit bietet sich die Möglichkeit die subjektiven Befragungsdaten über objektive Fahrdaten zu verifizieren oder zu falsifizieren.

Da nur bei der Dienstwagennutzer-Gruppe eine weitgehend exklusive Nutzung der Projektfahrzeuge durch die tatsächliche Auskunftsperson stattfand, kann sinnvollerweise nur diese Auskunftsgruppe für den Abgleich der objektiven Messdaten mit den subjektiven Befragungsdaten herangezogen werden. In 104 Projektfahrzeugen der Dienstwagennutzer-Stichprobe wurden insgesamt 29 Datenlogger verbaut. Da zwei Datenlogger wegen Fehlfunktionen während der Feldphase ausgetauscht werden mussten, wurden letztlich 27 Projektfahrzeuge von Dienstwagennutzern ausgerüstet (Ausrüstungsquote: 27,8%).

Entsprechend gehen in den folgenden Abgleich Datensätze aus 29 Datenloggern (objektive Daten) und Befragungsergebnisse einer Unterstichprobe der 27 Dienstwagennutzer mit ausgerüstetem Projektfahrzeug (subjektive Daten) ein. Zum Vergleich der beiden Datensätze wurden die Ergebnisse mit einer nichtparametrischen Teststatistik für ordinal-skalierte Variablen (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test) geprüft, die zentrale Tendenzen in verbundenen Stichproben untersucht. [22]

[22] Weiteres zu Wilcoxon: Vgl. Sachs (2013), S.244ff

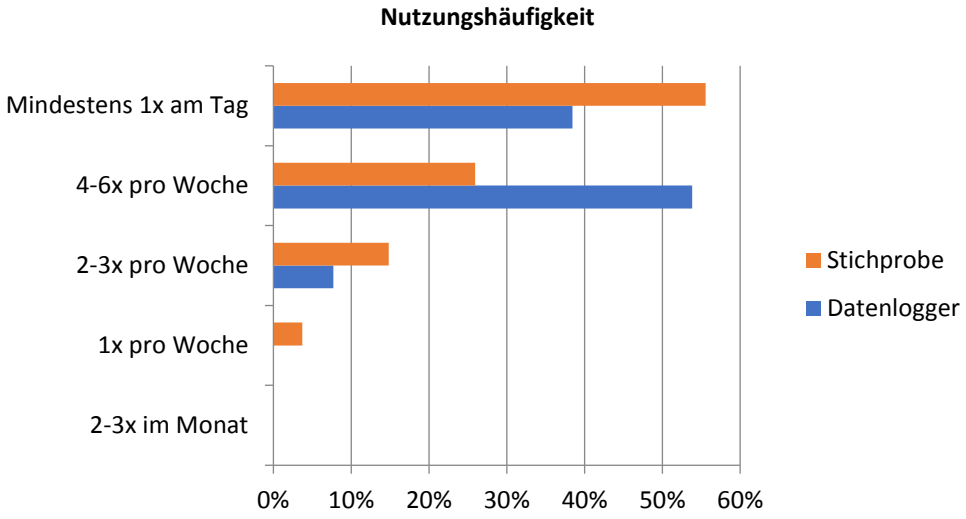


Abbildung 91: Nutzungshäufigkeit

Abbildung 91 zeigt, dass die Datenlogger eine leicht unterschiedliche Aktivität zeigen. 55% der ausgewählten Dienstwagennutzer geben an, dass sie das Projektfahrzeug täglich benutzen. Etwa 26% geben an, dass sie das Elektroauto zwischen 4- und 6-mal pro Woche benutzen, weitere 15% geben an, dass sie es nur 2- bis 3-mal pro Woche benutzen. Die Datenlogger vernehmen bei etwa 38% aller Fahrzeuge eine tägliche Aktivität, bei 54% eine Aktivität von 4-6-mal pro Woche. Die restlichen 8% verzeichnen 2-3-mal die Woche Bewegung. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Datenlogger und der Befragung sind statistisch jedoch nicht signifikant (p = 0,257), wie Tabelle 21 noch einmal illustriert.

Tabelle 21: Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für die Nutzungshäufigkeit

Statistik für Wilcoxon-Test	
	Nutzungshäufigkeit Datenlogger/Befragung
Z	-1,134
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,257

Hinsichtlich der Kilometerfahrleistung je Werktag lassen sich Ähnlichkeiten beim Vergleich der objektiven und subjektiven Daten feststellen. Nur 10% der verzeichneten Fahrdaten zeigen reale Tagesfahrleistungen von mehr als 100 Kilometern für Werktage. Nur 4% der Auskunftspersonen haben subjektiv eingeschätzt, dass sie an einem Werktag durchschnittlich mehr als 100 Kilometer fahren. Statistisch gesehen besteht kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Datensätzen (p = 0,083).

Die Unterschiede der Angaben in den Datensätzen (Abbildung 92) können demnach vernachlässigt werden. Fast 60% der Befragten geben an, dass sie mit ihrem Elektroauto bis zu 50 Kilometer pro Tag fahren. Die Datenlogger verzeichnen hier nur einen Anteil von etwa 52%. Sowohl Befragungsdaten als auch

Fahrdaten zeigen, dass die Projektfahrzeuge der herangezogenen Unterstichprobe von Dienstwagennutzern an Werktagen vor allem für Kurzstrecken eingesetzt wurden, Abbildung 92.

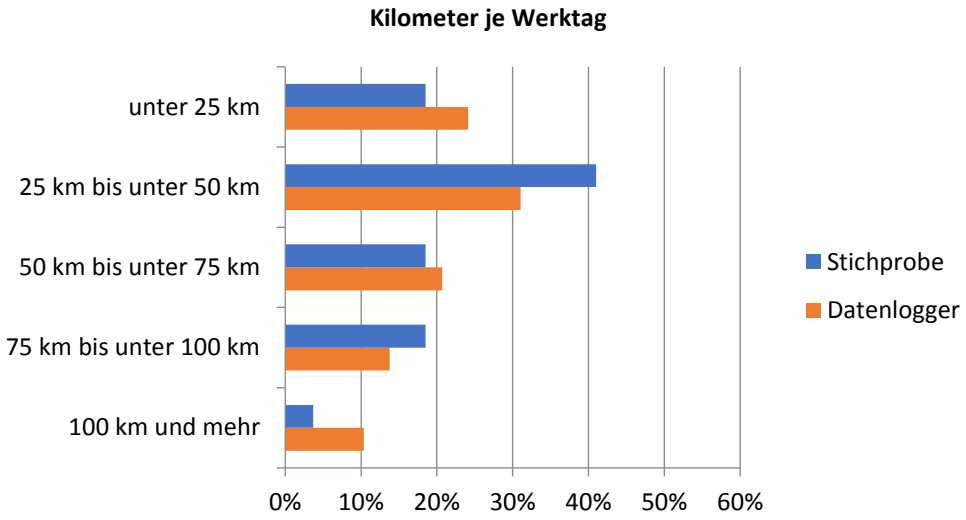


Abbildung 92: Kilometer je Werktag

Tabelle 22 zeigt die eben dargestellten Ergebnisse zum Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für die Variable Kilometer je Werktag und zusätzlich das Ergebnis für die ebenfalls zu vergleichende Variable Kilometer je Wochenende:

Tabelle 22: Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für die Kilometer je Werktag und die Kilometer je Wochenende

Statistik für Wilcoxon-Test		
	Kilometer je Werktag Datenlogger/Befragung	Kilometer je Tag am Wochenende Datenlogger/Befragung
Z	-1,732	-3,624
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,083	,000

Wie Tabelle 22 illustriert, fallen die Unterschiede zwischen den subjektiven Angaben und den gesammelten Fahrdaten zur Kilometerfahrleistung der Elektroautos für Tage an Wochenenden statistisch signifikant aus. Die Darstellung in Abbildung 93 bereitet die Verteilung der zurückgelegten Kilometer an Wochenendtagen noch einmal grafisch auf.

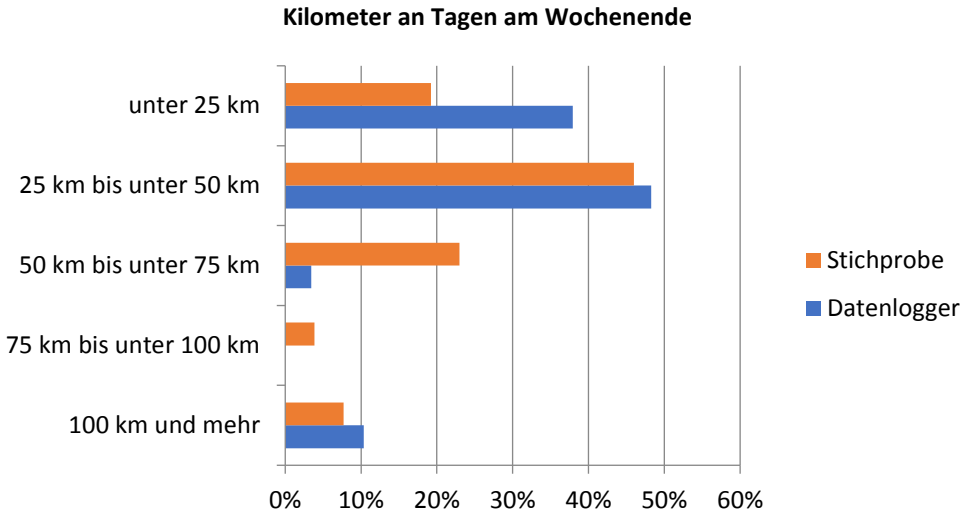


Abbildung 93: Kilometer am Wochenende

Die Datenlogger verzeichnen deutlich geringere Fahrleistungen als es aus den subjektiven Angaben der Unterstichprobe von Dienstwagennutzern hervorgeht. Fast 70% der Befragten fahren am Wochenende bis zu 50 Kilometer mit ihrem Elektroauto. Der Unterschied zwischen den Antworten der Befragten und den Daten aus den Datenloggern ist statistisch signifikant (p = 0,000).

Eine naheliegende Erklärung für die signifikanten Unterschiede ist, dass die Projektfahrzeuge zwar weitgehend, aber doch nicht völlig exklusiv von den Auskunftspersonen genutzt wurden: Andere Personen, etwa andere Mitarbeiter, Ehegatten oder weitere Familienmitglieder, haben häufig auch Zugriff auf die Projektfahrzeuge der Dienstwagennutzer. Da die Dienstwagennutzer immerhin einen durchschnittlichen Privatnutzungsanteil von 40% angeben, ist eine familiäre Nutzung nicht unwahrscheinlich. Diese kann schlechter eingeschätzt werden als die Eigennutzung.

Außerdem sind die durch die Güte des GPS-Signals naturgemäß eingeschränkten Aufzeichnungen der Datenlogger als Grund für die Abweichungen denkbar. Wie in Abschnitt 3.1.30 dargelegt (AP 6110), kam es während der Feldphase dazu, dass Fahrten aus verschiedenen Gründen unvollständig aufgezeichnet wurden. Der entwickelte Korrekturalgorithmus (AP 6110) hat möglicherweise nicht alle realen Fahrten vollständig reproduzieren können. Da mit zunehmender Streckenlänge auch die Wahrscheinlichkeit von fehlerhaften Aufzeichnungen – wie beispielsweise durch Signalabbrüche – zunimmt, ist es denkbar, dass die korrigierten objektiven Fahrdaten den Anteil längerer Fahrtstrecken weiterhin unterschätzen.

Bei der Analyse der Anteile von einfachen Streckenlängen an allen Fahrten werden bei der Anwendung des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests wiederum statistisch signifikante Unterschiede ermittelt (p = 0,000), wie Abbildung 94 zeigt.

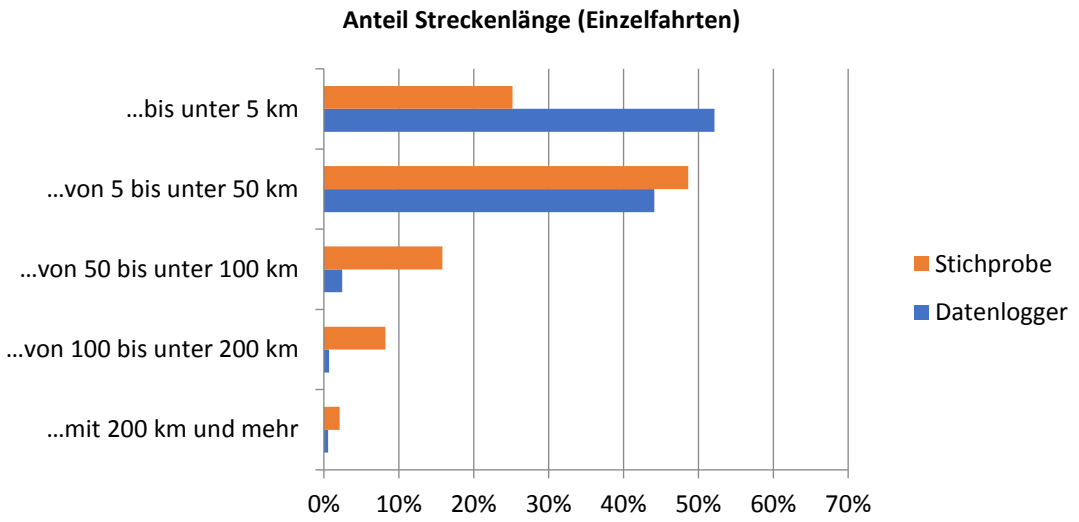


Abbildung 94: Anteil Streckenlänge (Einzelfahrten)

Bei mehr als 70% der Fahrten ist die einfache Streckenlänge laut den subjektiven Einschätzungen der Dienstwagennutzer-Unterstichprobe kürzer als 50 Kilometer. Unterstellt man fehlerfreie Fahrdaten, so ist davon auszugehen, dass die Auskunftspersonen der Unterstichprobe ihre zurückgelegten einfachen Streckenlängen signifikant überschätzen. Die Datenlogger deuten etwa auf einen Fahrtenanteil von mehr als 50% für einfache Strecken bis unter 5 Kilometer hin, während die Auskunftspersonen hier einen Fahrtenanteil von nur 25% schätzen.

Tabelle 23 zeigt noch einmal die Resultate der angewendeten Teststatistik für die Anteile von Streckenlängen bei der Betrachtung von Einzelfahrten.

Tabelle 23: Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für die Anteile (einfacher) Streckenlängen

Statistik für Wilcoxon-Test	
	Anteil Streckenlängen Datenlogger/Befragung
Z	-3,624
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,000

Schließlich wiederholt sich das Muster beim Vergleich der geschätzten und durch Fahrdaten berechneten Jahreskilometerfahrleistungen. Abbildung 95 zeigt die Werteverteilung aus beiden Datensätzen für verschiedene Kategorien von Jahreskilometerfahrleistungen.

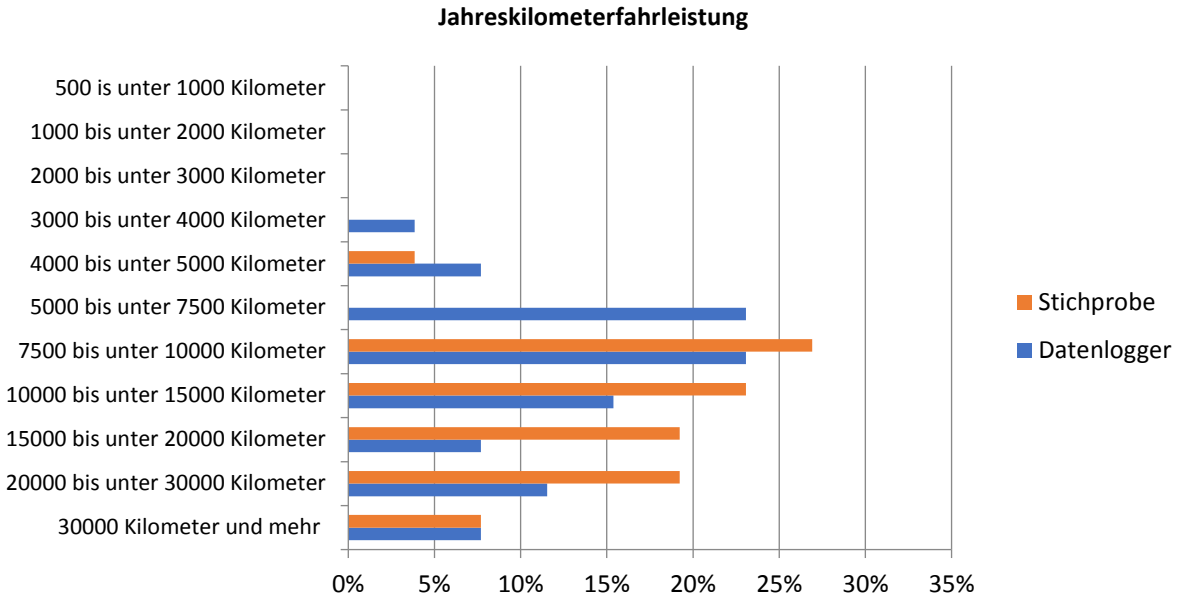


Abbildung 95: Jahreskilometerfahrleistung

Die geprüften Unterschiede sind ebenfalls statistisch signifikant (0,000). In Abbildung 95 ist zu erkennen, dass die Projektfahrzeuge von den Auskunftspersonen der Unterstichprobe nach eigenen Angaben intensiver genutzt wurden als es die Fahrdaten zeigen. Über 25% der Auskunftspersonen legen mit ihren Projektfahrzeugen nach eigenen Angaben mehr als 20.000 Kilometern pro Jahr zurück. Nur etwa 5% haben mit ihrem Projektfahrzeug subjektiv weniger als 7.500 Kilometer im Jahr zurückgelegt, was im Einklang mit dem Befragungsresultat steht, dass das Projektfahrzeug für 50% der Dienstwagennutzer nach der Fahrtenanzahl sogar das Erstfahrzeug im Privathaushalt darstellt.

Tabelle 24 zeigt noch einmal die Resultate der angewendeten Teststatistik für die Jahreskilometerfahrleistung als Erhebungsgröße.

Tabelle 24: Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für die Jahresfahrleistung

Statistik für Wilcoxon-Test	
	Jahreskilometerfahrleistung Datenlogger/Befragung
Z	-4,291
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,000

Wie zuvor erwähnt, gehören die für den Vergleich von Mess- mit subjektiven Befragungsdaten herangezogenen Auskunftspersonen ausschließlich zur Gruppe der Dienstwagenfahrer. Da die individuellen Leasingverträge der Projektfahrzeuge hinsichtlich der Jahresfahrleistung Obergrenzen vorgeben, und diese

auch regelmäßig kontrolliert und berichtet werden, war zu erwarten, dass die realen Jahreskilometerfahrleistungen den Auskunftspersonen während der Zweitbefragungsrunde (mindestens 7 bis 9-monatige Nutzung) gut bekannt waren. Bei der Quantifizierung der Jahreskilometerleistung aus Messdaten gilt es zu berücksichtigen, dass diese eine Hochrechnung der Fahrleistung aus dem jeweiligen Vermessungszeitraum auf ein Jahr darstellt. Dabei entspricht bzw. übersteigt die Datengrundlage von etwa 20% der ausgerüsteten Dienstwagen das zeitliche Intervall eines Kalenderjahres, so dass für ungefähr 80% der Fahrzeuge angenommen werden muss, dass das aufgenommene Fahrverhalten ganzjährig repräsentativ ist. Demzufolge können Diskrepanzen zwischen den subjektiven Einschätzungen und den hochskalierten Fahrleistungen in einem Jahr auftreten.

Der Abgleich von Fahrdaten mit den durch Befragungen erhobenen subjektiven Daten hat gezeigt, dass es bei den herangezogenen Größen häufig statistisch signifikante Unterschiede zwischen den subjektiven Einschätzungen und gesammelten Fahrdaten gibt. Allerdings sind die Tendenzen von subjektiven und objektiven Daten bei allen betrachteten Größen einheitlich. Kritisch anzumerken ist die recht geringe Stichprobengröße, die für den Abgleich beider Datensätze genutzt werden konnte. Aufgrund der kleinen Unterstichprobengröße und technischer Probleme der Datenlogger kann hier keine abschließende Beurteilung der Güte der subjektiven Einschätzungen der Auskunftspersonen erfolgen.

3.1.18 AP 4600 Entwicklung und Anwendung eines flottenspezifischen Modells für einen ökologisch optimierten Flotten-Mix

Ziele des Arbeitspakets 4600

Die Ziele des Arbeitspakets waren die Konzeption und Anwendung eines Entscheidungsmodells. Das Entscheidungsmodell sollte die Fahrzeugbeschaffungsentscheidungen unterschiedlicher Fuhrparkleiter simulieren und so Aussagen darüber treffen, ob, und wenn ja wann, über den Einsatz von Elektrofahrzeugen ökologisch optimierte Fuhrparks realisierbar sind.

3.1.19 AP 4610 Grundlegende Konzeption des Modellrahmens eines flottenspezifischen Tools für einen ökologisch optimierten Flotten-Mix

Ziele des Arbeitspakets 4610

Das Ziel des Arbeitspakets war die Konzeption eines Modellrahmens für das Entscheidungsmodell zur Simulation von Fahrzeugbeschaffungsentscheidungen.

Grundmodell:

Kleindorfer et al. entwickelten auf Basis bestehender Equipment Replacement-Modelle ein Entscheidungsmodell für die französische Post *La Poste* zur Elektrifizierung ihrer Flotte. Dabei vergleichen sie eine vorhandene Technologie mit einer neueren: Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (*Internal Combustion Vehicle,* ICV) und Elektrofahrzeuge (*Battery Electric Vehicles,* BEV). Hierzu betrachten Kleindorfer et al.

zukünftige Kraftstoffpreise und Batteriekosten als Schlüsselparameter für die Entwicklung der Elektromobilität in Flotten. Innerhalb dieser Modellierung leiten sie einen optimalen Zeitpunkt für den Einsatz von Elektrofahrzeugen und Sensitivitäten der Schlüsselparameter her. Des Weiteren evaluieren sie die totalen Kosten einer Flottenerneuerung über einen Planungshorizont von 15 Jahren, was ihnen ermöglicht, eine optimale Strategie für die Elektrifizierung der Flotte zu entwickeln. Somit kann die entwickelte Strategie bzw. das Modell La Poste bei Verhandlungen mit wichtigen Stakeholdern unterstützen.[23]

Um geeignete Annahmen für die Lebenszykluskosten zu treffen, müssen genaue Informationen über Betriebs- und Wartungskosten und Leasinggebühren beider Technologien vorhanden sein. Bei den Betriebskosten eines ICV wird angenommen, dass sie primär aus Dieselkosten bestehen. Der Dieselpreis ist dabei abhängig von zufälligen Fluktuationen. Wartungskosten wurden anhand historischer Daten der bereits existierenden Flotten extrapoliert. Die Leasinggebühren für ICV werden als mit der Zeit steigend angenommen. Dies wird mit dem wachsenden Druck zur Effizienzverbesserung und dem sinkenden Restwert aufgrund günstigerer Fahrzeugalternativen begründet. Für den Restwert von BEV wurden angesichts fehlender Daten Ergebnisse aus Experteninterviews zur Hand genommen. Stromkosten werden als konstant angenommen, da sie nur einen geringen Einfluss auf die Betriebskosten haben sollen. Für BEV wird die Annahme getroffen, dass die Betriebskosten um 30 % geringer als bei ICV sind.

Aufgrund des hohen Anschaffungspreises für Elektrofahrzeuge können Batterien vom Chassis getrennt verkauft bzw. geleast werden. Daher werden bei BEV Batterie und Anschaffungspreis bzw. Leasinggebühren separat betrachtet. Zudem sollen die Leasinggebühren aufgrund von Skalen- und Lerneffekten mit der Zeit sinken. Für Batterien wird angenommen, dass die Lithium-Ionen-Technologie sich durchsetzen wird. Weiterhin wird in ihrem Modell der Rest- bzw. Schrottwert der Batterie aufgrund fehlender Daten nicht betrachtet; es wird angenommen, dass die Batterie nach Ablauf verschrottet wird.

Das Modell basiert auf einer zeitdiskreten dynamischen Programmierung, wobei die zukünftigen Kraftstoffpreise und Batteriekosten die primären Unsicherheitsfaktoren darstellen. Hierzu wird gezeigt, dass die fahrzeugspezifischen erwarteten Total Cost of Ownership (TCO) das relevante Entscheidungskriterium darstellen. Die Funktion zur Minimierung der erwarteten Flottenkosten G^t in Abhängigkeit vom Kraftstoffpreis f^t und den Batteriekosten B^t über den gesamten Entscheidungshorizont lautet:

$$G^t(f^t,\, B^t) = \min_{n_e^t \geq 0,\, n_i^t \geq 0} \{n_e^t(a_e^t + B^t) + n_i^t a_i^t + \rho \mathbb{E}[s_e^{t+1} k_e e^{t+1} + s_i^{t+1} k_i f^{t+1} + G^{t+1}(f^{t+1}, B^{t+1})]\} \tag{3-1}$$

Die Indizes e und i stehen für BEV respektive ICV. Die Größe n beschreibt die Anzahl der anzuschaffenden Fahrzeuge, a die diskontierten totalen Leasing- und Wartungskosten eines einzelnen Fahrzeugs, B den Batteriepreis in der jeweiligen Periode t. Weiter repräsentieren ρ den Diskontierungsfaktor, s^{t+1} die

[23] Vgl. Kleindorfer et al. (2012)

Anzahl der Fahrzeuge in der Flotte zwischen t und $t+1$. k_e und k_i beschreiben den jeweiligen Strom- bzw. Kraftstoffverbrauch, wohingegen e den Strompreis repräsentiert.

Kleindorfer et al. zeigen, dass es optimal ist, nur eine Antriebsart pro Periode anzuschaffen. Die optimale Entscheidung wird daher durch die minimalen erwarteten TCO determiniert, die auf den zuletzt verfügbaren Kraftstoff- und Batteriepreis basieren. Somit können die totalen diskontierten Flottenkosten zum Zeitpunkt $t = 0$ durch folgende Gleichung beschrieben werden, was durch Neboian et al. hergeleitet und bewiesen wird[24]:

$$G^0(f^0,\, B^0) = \sum_{t=0}^{T} \rho^t n^t \, \mathbb{E}[\min(E^t, I^t)] + E_R^0 + I_R^0 \tag{3-2}$$

Dabei stellen E^t und I^t die TCO von BEV respektive ICV zum Zeitpunkt t dar. E_R^0 und I_R^0 repräsentieren die verbleibenden Betriebskosten von Fahrzeugen, die vor dem Zeitpunkt $t = 0$ angeschafft wurden. Da E_R^0 und I_R^0 nicht durch Entscheidungen zu den Zeitpunkten $t \geq 0$ beeinflusst werden, werden sie zur Vereinfachung vernachlässigt. Somit ergibt sich folgende reduzierte optimale Kostenfunktion:

$$G^0(f^0,\, B^0) = \sum_{t=0}^{T} \rho^t n^t \, \mathbb{E}[\min(E^t, I^t)] \tag{3-3}$$

Diese optimale Kostenfunktion soll als Grundstein für die Modellentwicklung in diesem Vorhaben dienen. Dazu werden eigene Parameter in der TCO-Rechnung betrachtet und hergeleitet, die auf den deutschen Markt spezifiziert sind.

Modellentwicklung

In diesem Kapitel werden die für das Vehicle Replacement Modell relevanten Parameter erarbeitet. Hierbei wird jeder Parameter einzeln beschrieben. Alle Preise werden als Nettopreise dargestellt, da Unternehmen die Mehrwertsteuer in Höhe von 19% bei der jährlichen Steuererklärung absetzen können.

Herleitung der Modellgleichungen

Anhand von Gleichung 3-2 lautet die Formel zur Berechnung der optimalen diskontierten totalen Flottenkosten wie folgt, wobei der Index I ICV und der Index E BEV beschreibt:

$$G^0(k_D,\, B) = \sum_{t=0}^{T} n^t \cdot \min[TCO_{I^t}, TCO_{E^t}] + TCO_{E_{Rest}} + TCO_{I_{Rest}} \tag{3-4}$$

Dabei stellen k_D den Dieselpreis und B die Batteriekosten dar. Die Größe n^t beschreibt die Anzahl der Fahrzeuge, die in der jeweiligen Periode t angeschafft werden. TCO_{I^t} und TCO_{E^t} beschreiben jeweils die erwarteten diskontierten TCO eines ICV respektive eines BEV zum Zeitpunkt t. $TCO_{E_{Rest}}$ und $TCO_{I_{Rest}}$ sind

[24] Vgl. Neboain (2011)

verbleibende Betriebskosten, die durch Fahrzeuge entstehen, die zum Zeitpunkt $t = 0$ bereits in der Flotte sind. Analog zu Kleindorfer et al. bzw. Neboian et al. werden diese vernachlässigt. Somit lautet die vereinfachte Gleichung:

$$G^0(k_D,\, B) = \sum_{t=0}^{T} n^t \cdot \min[TCO_{I^t}, TCO_{E^t}] \tag{3-5}$$

Die TCO eines Verbrenners (ICV) werden wie folgt definiert:

$$TCO_{I^t} = \rho^t \left(a_I^t - r_I^{t+\frac{l}{12}-1} \right) + \sum_{\tau=t}^{t+\frac{l}{12}-1} \rho^\tau (k_{v_I}^\tau + k_{f_I}^\tau) \tag{3-6}$$

Hierbei stellen ρ^t den Diskontierungsfaktor zum Zeitpunkt t, a_I^t den Anschaffungspreis zum Zeitpunkt t und $r_I^{t+\frac{l}{12}-1}$ den Restwert nach Ablauf der Nutzung $t + \frac{l}{12} - 1$ dar, wobei l die Laufzeit in Monaten beschreibt. k_{v_I}und k_{f_I} beschreiben die variablen Kosten respektive die fixen Kosten über den gesamten Nutzungszeitraum.

Die variablen Kosten k_{v_I} eines ICV werden wie folgt definiert:

$$k_{v_I} = k_{v_i} + k_{v_{I_W}} \tag{3-7}$$

Hierbei stellen k_{v_i} die Kraftstoffkosten und $k_{v_{I_W}}$ die Werkstattkosten dar. Weiter werden Kraftstoffkosten folgenderweise berechnet:

$$k_{v_i} = v_i \cdot k_D \cdot s \tag{3-8}$$

v_i definiert den Kraftstoffverbrauch in Liter pro km, k_D den Dieselpreis pro Liter und s die Jahresfahrleistung in km. Die Fixkosten k_{f_I} eines Verbrenners setzen sich aus der Kfz-Steuer $k_{f_{I_S}}$, der jährlichen Versicherung $k_{f_{I_V}}$ und der HU/AU $k_{f_{I_U}}$ zusammen:

$$k_{f_I} = k_{f_{I_S}} + k_{f_{I_V}} + k_{f_{I_U}} \tag{3-9}$$

Zur Berechnung der TCO eines Elektrofahrzeugs wird die nachstehende Gleichung verwendet:

$$TCO_{E^t} = \rho^t \left(a_E^t + B^t - P^t - r_E^{t+\frac{l}{12}-1} \right) + \sum_{\tau=t}^{t+\frac{l}{12}-1} \rho^\tau (k_{v_E}^\tau + k_{f_E}^\tau) \tag{3-10}$$

P^t definiert eine Kaufprämie, die in Deutschland nach aktuellem Stand bis 2020 gefördert wird. a_E^t stellt den Anschaffungspreis zum Zeitpunkt t und $r_E^{t+\frac{l}{12}-1}$ den Restwert nach Ablauf der Nutzung $t + \frac{l}{12} - 1$ dar. Die variablen Kosten k_{v_E} setzen sich aus den Stromkosten k_{v_e} und den Werkstattkosten $k_{v_{E_W}}$ zusammen:

$$k_{v_E} = k_{v_e} + k_{v_{E_W}} \tag{3-11}$$

Weiter werden die Stromkosten folgenderweise berechnet:

$$k_{v_e} = v_e \cdot e \cdot s \tag{3-12}$$

v_e definiert den Stromverbrauch in kWh pro km, e den Strompreis pro kWh und s die Jahresfahrleistung in km. Die Fixkosten k_{f_E} eines Elektrofahrzeugs setzen sich aus der Kfz-Steuer $k_{f_{E_S}}$, der jährlichen Versicherung $k_{f_{E_V}}$ und der HU/AU $k_{f_{E_U}}$ (abzüglich der technologiebedingten Abgasuntersuchung) zusammen:

$$k_{f_E} = k_{f_{E_S}} + k_{f_{E_V}} + k_{f_{E_U}} \tag{3-13}$$

Im Folgenden wird die Wahl der Parameter diskutiert.

Herleitung der Parameter

Für die Modellierung in diesem Vorhaben soll ein Fahrzeug mit Dieselmotor mit einem nach dem Conversion-Design-Ansatz entwickelten Elektrofahrzeug verglichen werden. Hierbei wurden folgende Fahrzeuge ausgewählt:

ICV: VW Golf 1.6 TDI BMT Trendline
(ab 03/17)

- Leistung: 85 kW
- Verbrauch: 4,1 l / 100 km
- Bruttolistenpreis: 23.100,00 €
- Nettolistenpreis: 19.411,76 €

BEV: VW e-Golf
(ab 04/17)

- Leistung: 100 kW
- Batteriekapazität: 35,8 kWh
- Verbrauch: 12,7 kWh / 100 km
- Bruttolistenpreis: 35.000,00 €
- Nettolistenpreis inkl. Batterie: 29.411,76 €

Der Parameter *anzuschaffende Fahrzeuge n* beschreibt dabei die Anzahl der Fahrzeuge, die in einer Periode beschafft werden sollen. Hierbei wird der Bedarf durch den Fuhrparkleiter ermittelt.

Zeit und Planungshorizont

In diesem Modell wird eine für Unternehmen übliche jährliche Periode angenommen. Der Planungshorizont T beschreibt hierbei die Anzahl an Jahren, die in diesem Modell betrachtet werden. In diesem Fall startet der Planungshorizont mit dem Jahr 2017 und endet 2027. Je länger dieser Planungshorizont ist, desto höher sind auch Unsicherheiten und Risiken, die auf das Modell einwirken. Somit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass das Modell unpräziser wird und von der Realität abweichende Ergebnisse liefert. Die Zeit t beginnt mit dem Zeitpunkt $t = 0$, was dem heutigen Zeitpunkt (2017) entspricht. Was vor ($t < 0$)

oder nach dem Planungshorizont ($t > T$) geschieht, hat keinen Einfluss auf das Modell und wird somit vernachlässigt.

Diskontierung

Ein *Diskontierungsfaktor* ρ beschreibt den relativen Geldwert heute mit dem Geldwert in der nächsten Zeiteinheit misst. Der Diskontierungsfaktor ρ wird wie folgt berechnet:

$$\rho = \frac{1}{(1+i)^t} \tag{3-14}$$

Dabei stellt i den Nominalzinssatz dar, der hier mit 1% gewählt wird.[25] Somit ergeben sich die in Tabelle 25 dargestellten Werte für den Diskontierungsfaktor ρ.

Tabelle 25: Diskontierungsfaktor pro Periode

t	ρ
0	1
1	0,99009901
2	0,980296049
3	0,970590148
4	0,960980344
5	0,951465688
6	0,942045235
7	0,932718055
8	0,923483222
9	0,914339824
10	0,905286955

Anschaffungspreis

Der Anschaffungspreis a beschreibt die Kosten, die beim Erwerb eines Fahrzeugs anfallen. Wie bereits in der Einleitung dieses Kapitels erwähnt wurde, wird der Preis als Nettopreis dargestellt. Im Falle des

[25] Vgl. WiBe-TEAM (2016)

Elektrofahrzeugs wird die Batterie nach dem Prinzip des Conversion-Designs von der Kostenseite her separat betrachtet und vom Anschaffungspreis getrennt.

Es wird angenommen, dass die Anschaffungspreise für beide Antriebsarten aufgrund von Inflation und anderen Faktoren steigen wird. In Abbildung 96 wird der Anstieg der durchschnittlichen Pkw-Neuwagen-Preise im Zeitraum 2005-2015 dargestellt. Aus diesen Werten ergibt sich ein durchschnittlicher Anstieg von 2,329% pro Jahr. Dieser durchschnittliche Anstieg wird in der Modellierung für die zukünftigen Anschaffungspreise übernommen.

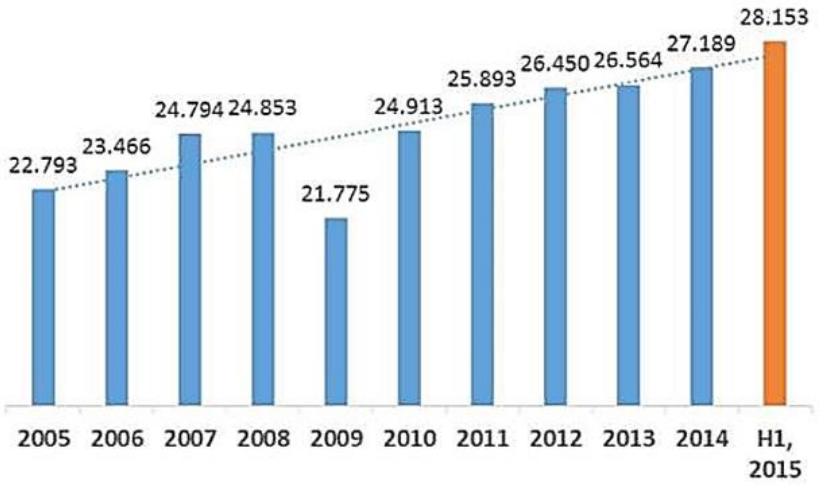


Abbildung 96: Anstieg der durchschnittlichen Pkw-Neuwagen-Preise[26]

Batterie: Technologie und Preisentwicklung

Um geeignete Preis-Annahmen für die Batteriepreise zu treffen, müssen genaue Informationen über die derzeitigen und vorhergesagten Kosten vorliegen. Im Rahmen einer Meta-Studie hat Nykvist 85 verschiedene Quellen im Zeitraum von 2007 bis 2014 über aktuelle und prognostizierte Batteriepreise analysiert. Diese Quellen beinhalten sowohl Publikationen und Nachrichten mit Expertenmeinungen als auch die angegebenen Preise von Fahrzeugherstellern wie Nissan, Tesla, BMW.

Das in Abbildung 97 illustrierte Ergebnis der Studie zeigt, dass die Batteriekosten in den letzten Jahren rapide gesunken sind. Bemerkenswert ist hierbei, dass die Batteriekosten einiger Hersteller (grüne Markierung) schon heute teilweise unter den prognostizierten Werten von 2020 (gelbe Markierung) liegen:

[26] Entnommen aus: CAR Universität Duisburg-Essen (2015)

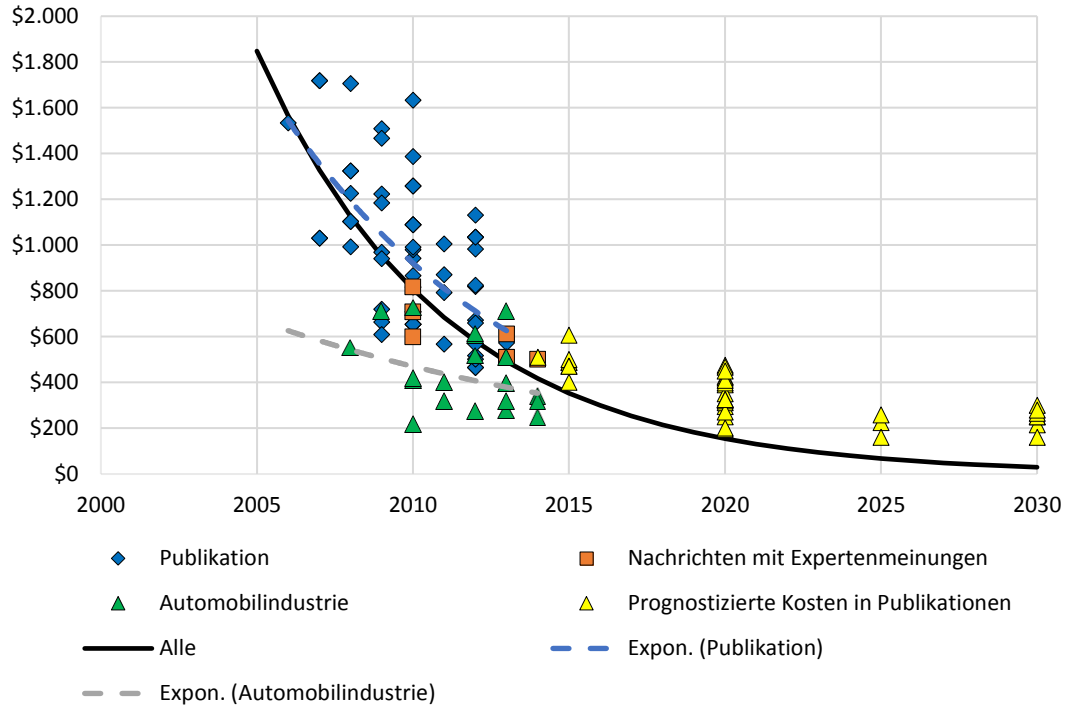


Abbildung 97: Li-Ion-Batteriekosten für Elektrofahrzeuge in US-Dollar pro kW/h (modifiziert nach Nykvist (2015), S. 330)

Anhand dieser Daten sollen die zukünftigen Batteriekosten für das zu entwickelnde Modell abgeleitet werden. Hierzu werden aus allen gegebenen Daten (blaue, grüne und rote Markierungen) Zukunftswerte bis zum Jahr 2030 extrapoliert (schwarze Linie). Es wird allgemein angenommen, dass die Kostenlinie exponentiell verläuft und dass das Elektrofahrzeug dem Verbrenner bei 150 $/kWh aus finanzieller Sicht ebenbürtig ist.[27] Hieraus ergeben sich die Batteriepreise nach Tabelle 26.

Tabelle 26: Abgeleitete Batteriekosten

Jahr	Preis in $/kWh	Preis in €/kWh[28]	Jahr	Preis in $/kWh	Preis in €/kWh
2005	$1.847,96	1.754,45 €	2018	$215,19	204,30 €
2006	$1.566,23	1.486,98 €	2019	$182,38	173,15 €
2007	$1.327,45	1.260,28 €	2020	$154,58	146,75 €
2008	$1.125,08	1.068,15 €	2021	$131,01	124,38 €

[27] Vgl. Nykvist (2015), S. 330.

[28] Umrechnungskurs: 1 $ = 0,9494 €

2009	$953,56	905,31 €	2022	$111,04	105,42 €
2010	$808,18	767,29 €	2023	$94,11	89,35 €
2011	$684,97	650,31 €	2024	$79,76	75,73 €
2012	$580,55	551,17 €	2025	$67,60	64,18 €
2013	$492,04	467,14 €	2026	$57,30	54,40 €
2014	$417,03	395,92 €	2027	$48,56	46,10 €
2015	$353,45	335,56 €	2028	$41,16	39,08 €
2016	$299,56	284,41 €	2029	$34,88	33,12 €
2017	$253,89	241,05 €	2030	$29,56	28,07 €

Der Break-Even-Point scheint somit im Jahr 2021 erreicht zu werden. Anhand der Wertetabelle und des exponentiellen Verlaufs wird ersichtlich, dass sich die Trendlinie asymptotisch dem Wert Null nähert, was unrealistisch erscheint. Ob eine Prognose in einem von Unsicherheiten dominierten Umfeld wie der Batterietechnologie bis in das Jahr 2030 zudem noch valide ist, sei dahingestellt. Der Trend kann zudem sowohl positiv als auch negativ beeinflusst werden. Falls z.B. der Ölpreis künftig niedrig bleibt, ist davon auszugehen, dass die Batteriepreise nicht signifikant sinken werden. Werden dagegen z.B. die geplanten Batteriefabriken von Tesla-Panasonic, BYD und LG ein Erfolg, so ist aufgrund von Massenproduktion und Lerneffekten mit signifikant sinkenden Preisen zu rechnen.

Im Rahmen eine Studie hat McKinsey festgestellt, dass die Batteriepreise von 2010 bis 2016 um 77% gesunken sind, womit der aktuelle Preis bei knapp 230 $/kWh liegt (siehe Abbildung 98).[29] Im Vergleich dazu ergibt sich in dem hier berechneten Modell in den Jahren 2010 bis 2016 ein Preissturz von lediglich 63% auf rund 300 $. Daraus folgt, dass die realen Batteriekosten insgesamt günstiger ausfallen als die prognostizierten in dem vorliegenden Modell.

[29] Vgl. McKinsey & Company (2017), S. 10

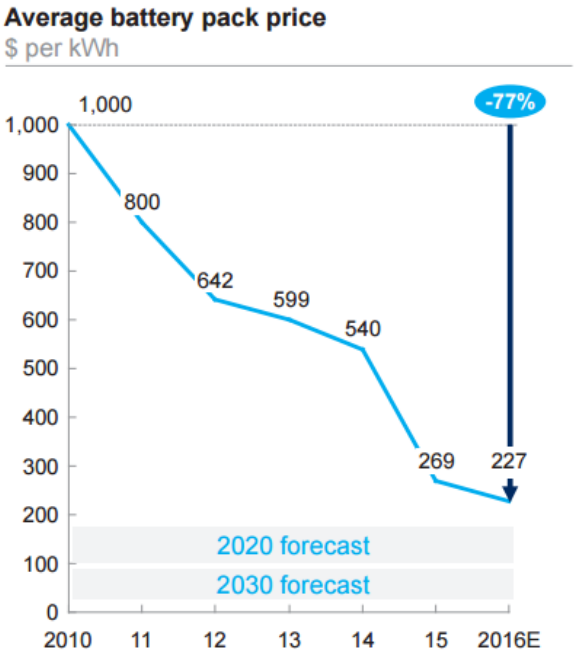


Abbildung 98: Durchschnittliche Batteriepreise 2010-2016 (McKinsey & Company (2017), S. 10)

Kaufprämien und Steuererleichterungen

Wie die Resultate verschiedener Studien gezeigt haben, sehen Kunden den hohen Anschaffungspreis eines Elektrofahrzeugs als negativ an. In einer Untersuchung des *Centers für Automobil-Management (CAMA)* wurde die Zahlungsbereitschaft potentieller Käufer von Elektrofahrzeugen ermittelt (Abbildung 99).[30] So konnte festgestellt werden, dass zwischen der von den Befragten festgesetzten Preisobergrenze des akzeptablen Preisbereichs und den gängigen BEV-Modellen *Citroen C-Zero* und *Mitsubishi i-MiEV* eine Lücke von 10.000 € liegt. Um solche Lücken zu verkleinern bzw. zu schließen, können z.B. seitens Regierung Kaufprämien und Steuererleichterungen bei der Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben gewährt werden.

[30] Vgl. Proff (2013), S. 4 ff.

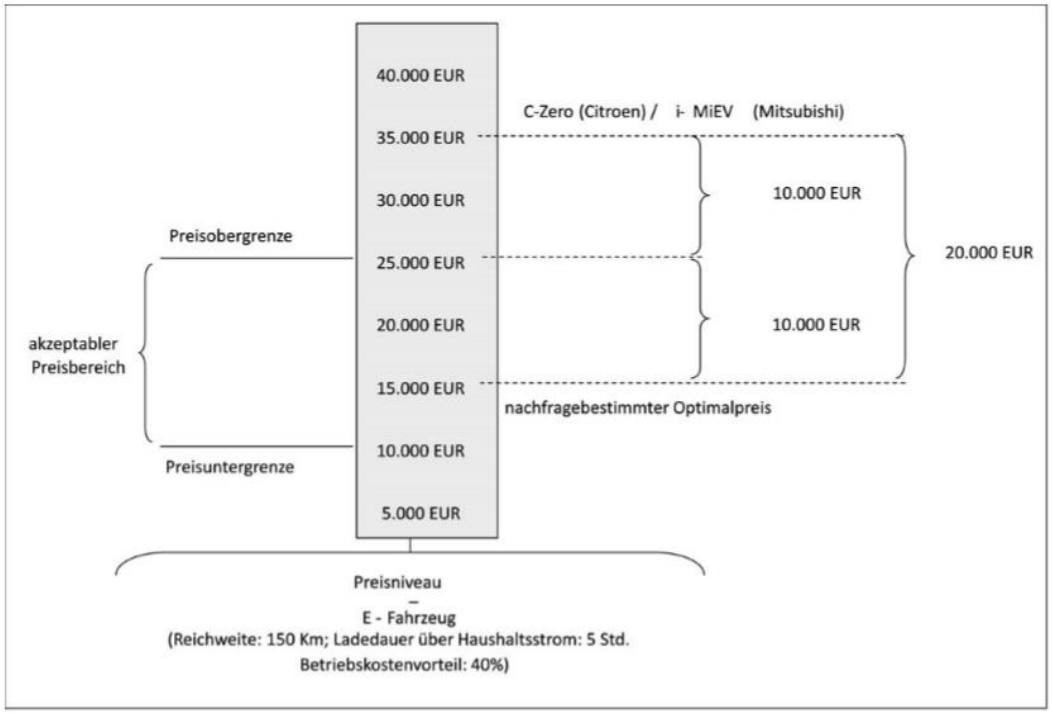


Abbildung 99: Zahlungsbereitschaft für Elektrofahrzeuge (Proff (2013), S. 5)

In diversen Ländern der EU werden beim Kauf von Fahrzeugen auch Steuern abhängig vom CO_2- bzw. Schadstoffausstoß erhoben.[31] Derzeitige Anreize einiger europäischer Länder für die Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben werden daher in Tabelle 27 dargestellt.

[31] Zu den EU-Ländern zählen: Belgien, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Kroatien, Lettland, Malta, Niederlande, Österreich. Portugal, Rumänien, Slowenien, Spanien, Ungarn, Zypern. Detaillierte Informationen in ACEA (2016a), S. 5 f.

Tabelle 27: Anreize für die Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben in ausgewählten europäischen Ländern

Anreiz	Frankreich[32]	Schweden[33]	Norwegen[34]	Deutschland[35]
Kaufprämie	61-110 g CO_2/km: Bonus von 750 € 21-60 g CO_2/km: Bonus von 1.000 € ≤ 20 g CO_2/km: Bonus von 6.300 €	1-50 g CO_2/km: 20.000 SEK[36] 0 g CO_2/km: 40.000 SEK	-	Elektrofahrzeug: 4.000 € Hybridfahrzeug: 3.000 €
Bonus-/Malus-System	Bonus: siehe oben, Malus: >130g CO_2/km: 150 € > 200g CO_2/km: 8.000 €	-	-	-
Steuerbefreiung	<110 g CO_2/km: zwei Jahre von Firmenwagenbesteuerung befreit	Elektro- und Hybridfahrzeuge für fünf Jahre von der Kfz-Steuer befreit	Wegfall der MwSt. und Importsteuer	bis 2015: zehn Jahre Kfz-Steuer-Befreiung ab 2016: fünf Jahre Kfz-Steuer-Befreiung

[32] Werte entnommen aus: ACEA (2016a), S. 5; ACEA (2016b), S. 2; Kreyenberg (2015), S. 34 f;

[33] Werte entnommen aus: ACEA (2016b), S. 4

[34] Werte entnommen aus: Handelsblatt (2015)

[35] Werte entnommen aus: Die Bundesregierung (2016a), Die Bundesregierung (2016b)

[36] 1 SEK = 0,1013 €

In Deutschland wird seit 2016 der Kauf eines Elektrofahrzeugs mit einem Zuschuss von 4.000 € bzw. eines Hybridfahrzeugs mit einem Zuschuss von 3.000 € gefördert. Dabei wird der Bonus jeweils zur Hälfte von der Bundesregierung und zur Hälfte von der Industrie finanziert. Weiterhin gilt für alle Elektrofahrzeuge mit erstmaliger Zulassung vom 18. Mai 2011 bis 31. Dezember 2015 eine Verlängerung der Befreiung der Kfz-Steuer von fünf auf zehn Jahre. Elektrofahrzeuge mit einer Erstzulassung vom 1. Januar 2016 bis zum 31. Dezember 2020 bleiben fünf Jahre von der Steuer befreit.

Die Prämie P für Elektrofahrzeuge in dieser Modellierung beträgt somit bis einschließlich 2020 4.000 €. Darüber hinaus wird die Bedeutung einer solchen Prämie später im Modell analysiert.

Laufzeit und -leistung

Aus Sicht eines Fuhrparkleiters sind auch die Laufzeit und -leistung eines Fahrzeugs relevant. Die Laufzeit l wird in Monaten angegeben, wohingegen die Laufleistung s in km pro Jahr angegeben wird. In diesem Modell sind sowohl Laufleistung und auch Laufzeit frei wählbar.

- Wahl der Laufzeit l: 12, 24, 36, 48 Monate
- Wahl der Laufleistung s: 10.000, 15.000, 20.000, 25.000, 30.000 km

Die Befragungen im Rahmen des Vorhabens haben ergeben, dass das typische Nutzungsprofil 36 Monate Laufzeit und 15.000 km Laufleistung pro Jahr beträgt. Im späteren Verlauf wird dieses Nutzungsprofil als Standard-Nutzungsprofil bezeichnet.

Wertverlust und Restwert

Der Wertverlust w eines Fahrzeugs wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. So kann dieser z.B. vom Fahrzeugtyp (Kleinwagen, SUV, Sportwagen etc.), vom optischen und technischen Zustand oder auch vom Image und Alter abhängig sein. Der Restwert r nach Ablauf der Nutzungsdauer ergibt sich aus dem Anschaffungspreis bzw. dem Nettolistenpreis a abzüglich des Wertverlusts:

$$r = a - w \tag{3-15}$$

Durch die fehlende Reife und den kleinen Markt der Elektromobilität sind die Gebrauchtwagenpreise für Elektrofahrzeuge noch von hohen Unsicherheiten und Preisschwankungen betroffen. Laut einer Prognose von *Schwacke* soll ein VW e-Golf (Neupreis: 34.900 €, 10.000 km pro Jahr) nach vier Jahren einen Restwert von noch ca. 18.750 € haben, was einem Wertverlust von 46,3% entspräche.[37] Das Problem hierbei ist, dass der e-Golf erst seit 2014 verkauft wird und der beschriebene gebrauchte e-Golf somit zum heutigen Stand von 2017 noch nicht existiert.

[37] Vgl. Schade et al. (2016)

Dies zeigt, dass Prognosen zum Wertverlust sowohl für den Käufer eines Fahrzeugs als auch für den späteren Gebrauchtwagenmarkt relevant sind. So bieten u.a. *ADAC*, *Schwacke*, *autokostencheck.de* und *Bähr & Fess forecasts GmbH (B&F)* verschiedene Prognosen zur Ermittlung des Wertverlusts *w* an. Alle Prognosemethoden haben gemeinsam, dass im ersten Jahr ein Wertverlust in Höhe von 25-40% auftritt. Danach verläuft der Wertverlust linear mit 5-9% pro Jahr.[38]

Im Rahmen einer Masterarbeit an der Universität Duisburg-Essen wurde bereits eine Modellierung zum Wertverlust anhand der obigen Prognosen entwickelt.[39] Dabei wurde ähnlich wie oben ein zweistufiger Wertverlust angenommen. Im ersten Jahr beträgt der initiale Wertverlust 25%. Hinzu kommt ein altersbedingter Grundwertverlust von 3,5% pro Jahr und weitere 0,7% pro 5.000 km Jahresfahrleistung in den ersten fünf Jahren (Tabelle 28).

Tabelle 28: Modellierung des Wertverlusts über einen Zeitraum von fünf Jahren (modifiziert nach Hölzle (2014), S.68)

Initialer Wertverlust Jahr 1	25%
Wertverlust Jahr 1-5	3,5% + 0,7% je 5.000 km

Diese Annäherung soll hier verwendet werden. Um die Korrektheit des Modells zu überprüfen, werden hier reale Wertverluste von einigen Fahrzeugmodellen aus dem gleichen Segment beispielhaft mit dem Wertverlustmodell verglichen (Tabelle 29):

Tabelle 29: Wertverlustentwicklung Fahrzeuge aus dem Segment Kompaktklasse

	Bruttolisten-preis (BLP)	Restwert nach drei Jahren, 45.000 km[40]	Restwert nach drei Jahren, 35.000 km[41]	Wertverlust $\boldsymbol{w}$ [%]	Abweichung vom Modell
Modell		**Wertverlust: 41,8%**	**Wertverlust: 41,1%**		
Audi A3 TDI DPF Attraction	22450	-	13851	38,3%	-2,8%
BMW 118d	24550	-	17062	30,5%	-10,6%

[38] Vgl. Hölzle (2014), S. 65 ff.

[39] Vgl. ebenda

[40] Werte entnommen aus: Autobild (o.J.a.)

[41] Werte entnommen aus: Autobild (o.J.b.)

Ford Focus 1.6 TCDi DPF Ambiente	19025	-	10844	43%	+1,9%
Mercedes A 180	25055	12350	-	50,7%	+8,2%
Mercedes B 200 CDI	29809	17850	-	40,1%	-1,7%
Opel Astra 1.9 CDTI DPF	20005	-	11562	42,2%	+1,1%
VW Golf 1.4 TSI Comfortline	22360	12800	-	42,8%	+1%
Durchschnittliche Abweichung vom Modell					**-0,4%**

Die Werte aus Tabelle 29 zeigen, dass die durchschnittliche Wertverlust-Abweichung vom Modell lediglich -0,4% beträgt. Daraus folgt, dass diese Wertverlustmodellierung äußerst präzise ist. Dennoch stechen der BMW 118d (-10,6%) und der Mercedes A 180 (+8,2%) deutlich heraus. Diese Ausreißer lassen sich durch den im Modell fehlenden Einfluss der Marke bzw. des Images begründen.

Da die durchschnittliche Abweichung äußerst gering ausfällt und in diesem Arbeitspaket keine Fahrzeuge von Premium-Herstellern verglichen werden, wird die beschriebene Wertverlustmodellierung hier angewendet. Hieraus resultiert z.B. anhand einer Laufleistung von 15.000 km pro Jahr ein Wertverlust von 30,6% im ersten Jahr und 5,6% mit jedem weiteren Jahr. Mit der Laufzeit $L = 4$ Jahre folgt:

$$w\,[\%] = \sum_{i=1}^{L} w_i = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 30{,}6\% + 5{,}6\% + 5{,}6\% + 5{,}6\% \qquad (3\text{-}16)$$
$$w\,[\%] = 47{,}4\%$$

Es wird zunächst angenommen, dass der Wertverlust sowohl für den Verbrenner als auch für das Elektrofahrzeug gilt. Wie oben beschrieben, beträgt der Wertverlust eines VW e-Golf in der Schwacke-Prognose 46,3% (10.000 km Jahresfahrleistung). Wird in dem gegebenen Modell die gleiche Jahresfahrleistung angenommen, so ergibt sich ein Wertverlust in Höhe von 44,6%.[42] Die Abweichung beträgt somit lediglich +1,7%. Damit erscheint das Modell von Hölzle durchaus valide und realitätsnah.

[42] $w\,[\%] = 29{,}9\% + 4{,}9\% + 4{,}9\% + 4{,}9\% = 44{,}6\%$

Variable Kosten

Die variablen Kosten beinhalten beim Verbrenner Kraftstoffkosten (hier: Dieselkosten) und beim Elektrofahrzeug Stromkosten. Zusätzlich fallen für beide Antriebsarten regelmäßige Werkstattkosten durch Wartungen und Reparaturen an. Diese Betriebskosten werden im Folgenden beschrieben.

Kraftstoffkosten

Die Kraftstoffkosten eines Verbrenners k_{v_i} setzen sich aus dem Kraftstoffverbrauch v_i, dem Kraftstoffpreis für Benzin bzw. Diesel $k_{B|D}$ und der Fahrleistung s zusammen. Somit lautet die Gleichung zur Berechnung der Krafstoffkosten:

$$k_{v_i} = v_i * k_{B|D} * s \qquad (3\text{-}17)$$

k_{v_i}: Kraftstoffkosten eines Verbrenners [€]

v_i: Kraftstoffverbrauch eines Verbrenners [l / km]

$k_{B|D}$: Kraftstoffpreis (Benzin bzw. Diesel) [€ / l]

s: Laufleistung pro Jahr [km]

Im Folgenden werden die gewählten Werte der einzelnen Parameter diskutiert. Die Wahl der Laufleistung wurde zuvor bereits erläutert.

Kraftstoffpreis

Der Kraftstoffpreis $k_{B|D}$ beschreibt die Kosten für einen Liter Benzin bzw. Diesel. Um geeignete Prognosen für den Kraftstoffpreis zu erstellen, werden die Vergangenheitswerte von 1972 bis heute linear bis in das Jahr 2030 extrapoliert. Von den Kraftstoffpreisen wurde die Mehrwertsteuer subtrahiert, um den Netto-Kraftstoffpreis zu erhalten. Da sich der Mehrwertsteuersatz in Deutschland über die letzten 50 Jahre geändert hat, wurde für die Prognose die Entwicklung der Mehrwertsteuer seit 1968 mitberücksichtigt (Tabelle 30). Für die Prognose wird weiterhin angenommen, dass die Mehrwertsteuer bis 2030 konstant bleibt.

Tabelle 30: Entwicklung des Mehrwertsteuersatzes seit 1968[43]

1. Januar 1968 – 30. Juni 1968	10%
1. Juli 1968 – 31. Dezember 1977	11%
1. Januar 1978 – 30. Juni 1979	12%
1. Juli 1979 – 30. Juni 1983	13%

[43] Werte entnommen aus: Statista GmbH (2014)

1. Juli 1983 – 31. Dezember 1992	14%
1. Januar 1993 – 31. März 1998	15%
1. April 1998 – 31. Dezember 2006	16%
seit 1. Januar 2007	19%

Die lineare Trendextrapolation liefert jeweils eine Trendlinie und ein Bestimmtheitsmaß für beide Kraftstoffe. Somit ergibt sich für die Benzinpreisentwicklung folgende lineare Trendlinie:

$$y_B = 0{,}0219\, t + 0{,}2699 \qquad (3\text{-}18)$$

Das Bestimmtheitsmaß $R^2{}_B$ beträgt 0,9005 und verdeutlicht somit eine sehr hohe Korrelation zwischen den Vergangenheitswerten und dem prognostizierten Trend. Im direkten Vergleich dazu lautet die Regressionsgerade des Dieselpreises wie folgt:

$$y_D = 0{,}0179\, x + 0{,}2437 \qquad (3\text{-}19)$$

Das Bestimmtheitsmaß $R^2{}_D$ beträgt hier 0,7645 und ist somit geringer als beim Benzinpreis. Dennoch impliziert dieser Wert eine hohe Korrelation. Somit wird ersichtlich, dass sowohl für Benzin- als auch für Dieselpreise ein linearer Zusammenhang vorliegt. Daraus folgt, dass die gewählte Prognosemethode der linearen Trendextrapolation valide ist.

Die prognostizierten Nettopreise für Benzin- und Diesel-Kraftstoff pro Liter sind in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Prognostizierte Benzin- und Diesel-Kraftstoffpreise bis 2030

Kraftstoffpreis-Prognosen				
Jahr	**Benzin**	**ohne MwSt.**	**Diesel**	**ohne MwSt.**
2017	1,513 €	1,271 €	1,268 €	1,066 €
2018	1,540 €	1,294 €	1,290 €	1,084 €
2019	1,567 €	1,316 €	1,312 €	1,103 €
2020	1,593 €	1,339 €	1,334 €	1,121 €
2021	1,620 €	1,361 €	1,356 €	1,140 €
2022	1,647 €	1,384 €	1,378 €	1,158 €
2023	1,674 €	1,406 €	1,400 €	1,177 €
2024	1,700 €	1,429 €	1,422 €	1,195 €
2025	1,727 €	1,451 €	1,445 €	1,214 €
2026	1,754 €	1,474 €	1,467 €	1,232 €

2027	1,781 €	1,496 €	1,489 €	1,251 €
2028	1,807 €	1,519 €	1,511 €	1,269 €
2029	1,834 €	1,541 €	1,533 €	1,288 €
2030	1,861 €	1,564 €	1,555 €	1,307 €

Eine grafische Darstellung der Preisentwicklung ist in Abbildung 100 zu sehen. Diese Abbildung zeigt, dass die Entwicklung von Benzin- und Dieselpreise nahezu parallel verläuft. Zudem wird ersichtlich, welchen potentiellen Einfluss Krisen auf die Kraftstoffpreise haben können.[44]

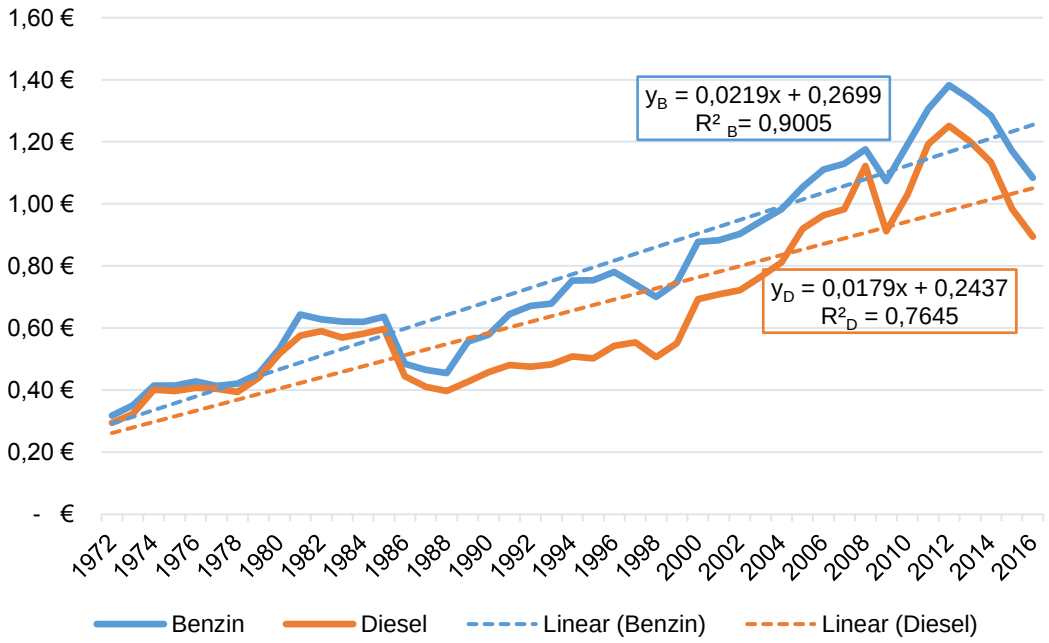


Abbildung 100: Benzin- und Diesel-Nettokraftstoffpreisentwicklung in Deutschland

Gerade die Talfahrt der Rohölpreise seit 2014, die die Kraftstoffpreise auf das Niveau von 2006 senkt, spielt eine erhebliche Rolle für die Zukunft der Elektromobilität. So ist der Rohölpreis Anfang 2016 auf unter 30 $ pro Barrel gesunken. Dies entspricht einem Minus von knapp 70% gegenüber Mitte 2014. Ein primärer Grund für diese Entwicklung ist der Kampf um Marktanteile, den die großen Fördernationen[45] derzeit führen, indem der Markt mit Öl überflutet wird. Günstiger Kraftstoff verringert die Opportunitätskosten der Elektromobilität und hemmt somit die Entwicklung.

[44] 1973 und 1979: Ölkrisen; ab 2007: Weltwirtschaftskrise; ab 2014: Ölpreis-Absturz

[45] Darunter: USA, Russland, Saudi-Arabien, China, Kanada

Prognosen unterliegen diversen Schwankungen wie z.B. die bereits erwähnten Krisen, sodass eine treffsichere Prognose kaum möglich ist. Sie sollen vielmehr eine ungefähre Aussage über die zukünftige Entwicklung geben. Die prognostizierten Werte werden daher mit prognostizierten Werten vom Projekt *Schaufenster Elektromobilität* der Bundesregierung und von einer Potentialanalyse zur Elektromobilität des *Fraunhofer ISI* verglichen, um ihre prognostische Validität zu überprüfen (Tabelle 32):

Tabelle 32: Vergleich der prognostizierten Kraftstoffpreise ohne Mehrwertsteuer

Jahr	**2020**	**2025**	**2030**
Benzin [€ / l]			
Vorliegende Arbeit	1,339	1,451	1,564
Bundesregierung[46]	1,29	1,42	1,57
Fraunhofer ISI[47]	1,387	-	-
Diesel [€ / l]			
Vorliegende Arbeit	1,121	1,214	1,307
Bundesregierung	1,08	1,20	1,32
Fraunhofer ISI	1,328	-	-

Der Vergleich der prognostizierten Werte verifiziert die prognostische Validität der gewählten Prognosemethode, da die Preise bis auf den Dieselpreis 2020 von Fraunhofer lediglich geringe Abweichungen vorweisen. Diese Abweichung lässt sich jedoch dadurch erklären, dass die Prognose zum Preis-Maximum von 2014 kurz vor dem oben erwähnten Ölpreissturz erstellt wurde.

Kraftstoffverbrauch

Der Kraftstoffverbrauch v_i wird im vorliegenden Bericht in Liter pro km [l / km] angegeben, um kilometergenaue Kraftstoffkosten zu berechnen. Beim VW Golf 1.6 TDI BMT Trendline wird vom Hersteller ein kombinierter Verbrauch von 4,1 l / 100 km angegeben, was einem Verbrauch von 0,041 l / km entspricht.

Die unabhängige Forschungsorganisation *International Council on Clean Transportation (ICCT)*, die im Jahr 2015 den Abgas-Skandal bei VW entdeckt und ausgelöst hatte, stellte in einer Untersuchung fest,

[46] Werte für Bundesregierung: Vgl. Schaufenster Elektromobilität (2016), S. 16

[47] Werte für Fraunhofer ISI: Vgl. Fraunhofer ISI (2014), S. 22

dass der reale Kraftstoffverbrauch bei Fahrzeugen des Baujahrs 2015 im Durchschnitt um 42 % von den angegebenen Werten der Hersteller abweicht.[48]

Dieser Mehrverbrauch erzeugt für den Halter des Fahrzeugs finanzielle Kosten, die im vorliegenden Modell mitberücksichtigt werden, um ein realitätsnahes Szenario zu präsentieren. Daher wird der angegebene Kraftstoffverbrauch von 0,041 l / km um 42 % erhöht. Somit beträgt der reale Kraftstoffverbrauch des VW Golf 1.6 TDI BMT Trendline $v_i = 0{,}058221\ l/km$.

Stromkosten

Die Stromkosten eines Elektrofahrzeugs k_{v_e} setzen sich aus dem Stromverbrauch v_e, dem Industrie-Strompreis e und der Fahrleistung s zusammen. Zusätzlich fällt die Anschaffung und Wartung einer Ladeinfrastruktur an, die hier allerdings vernachlässigt werden. Somit lautet die Gleichung zur Berechnung der Stromkosten:

$$k_{v_e} = v_e * e * s \tag{3-20}$$

k_{v_e}: Stromkosten eines Fahrzeugs mit alternativem Antrieb [€]

v_e: Stromverbrauch eines Fahrzeugs mit alternativem Antrieb [kWh / km]

e: Industriestrompreis [€ / kWh]

s: Laufleistung pro Jahr [km]

Strompreis

Der Strompreis e beschreibt die Kosten für eine Kilowattstunde Strom. Für die Strompreisentwicklung wird analog wie bereits für den Kraftstoffpreis eine lineare Trendextrapolation aus den Vergangenheitswerten erstellt. Hierzu werden die deutschen Strompreise sowohl für Privathaushalte[49] als auch für die Industrie[50] seit dem Jahr 2005 betrachtet. Letztere sind aus Sicht eines Fuhrparks bzw. eines Flottenmanagers und somit auch für die Modellentwicklung relevant. Für die Prognose wurde ebenfalls die Mehrwertsteuerentwicklung berücksichtigt und es wird angenommen, dass sie bis zum Ende des Zeithorizonts konstant bleibt.

Die lineare Trendextrapolation liefert auch hier jeweils eine Trendlinie und ein Bestimmtheitsmaß für sowohl Privathaushalte als auch für Industrieunternehmen. Eine grafische Darstellung wird in Abbildung 101 ersichtlich. Es ergibt sich für Privathaushalte folgende lineare Trendlinie.

[48] Vgl. ICCT (2016)

[49] Haushalt mittlerer Größe, inkl. Steuern, Jahresverbrauch: 2.500 kWh bis unter 5.000 kWh

[50] Industrielle Unternehmen mittlerer Größe, einschließlich Verbrauchssteuern, ohne MwSt., Jahresverbrauch: 2.000 MWh bis unter 20.000 MWh

$$y_P = 0{,}0123\,x + 0{,}1641 \quad (3\text{-}21)$$

Das Bestimmtheitsmaß R_P^2 beträgt 0,9668 und verdeutlicht somit eine nahezu perfekte Korrelation zwischen den Vergangenheitswerten und dem prognostizierten Trend. Im direkten Vergleich dazu lautet die Regressionsgerade für den Industriestrompreis:

$$y_I = -0{,}0006\,x + 0{,}0917 \quad (3\text{-}22)$$

Das Bestimmtheitsmaß R_I^2 beträgt 0,1296. Somit bleiben ca. 87 % der Variation unerklärt. Ein genauerer Blick auf den Preis-Verlauf charakterisiert einen nahezu konstanten Verlauf. Daher wird hier angenommen, dass sich der Strompreis aus industrieller Sicht bis 2030 nicht verändert. Bemerkenswert ist, dass im Vergleich zum Industriestrompreis der Preis für Privathaushalte im Durchschnitt um einen Cent pro Jahr steigt.

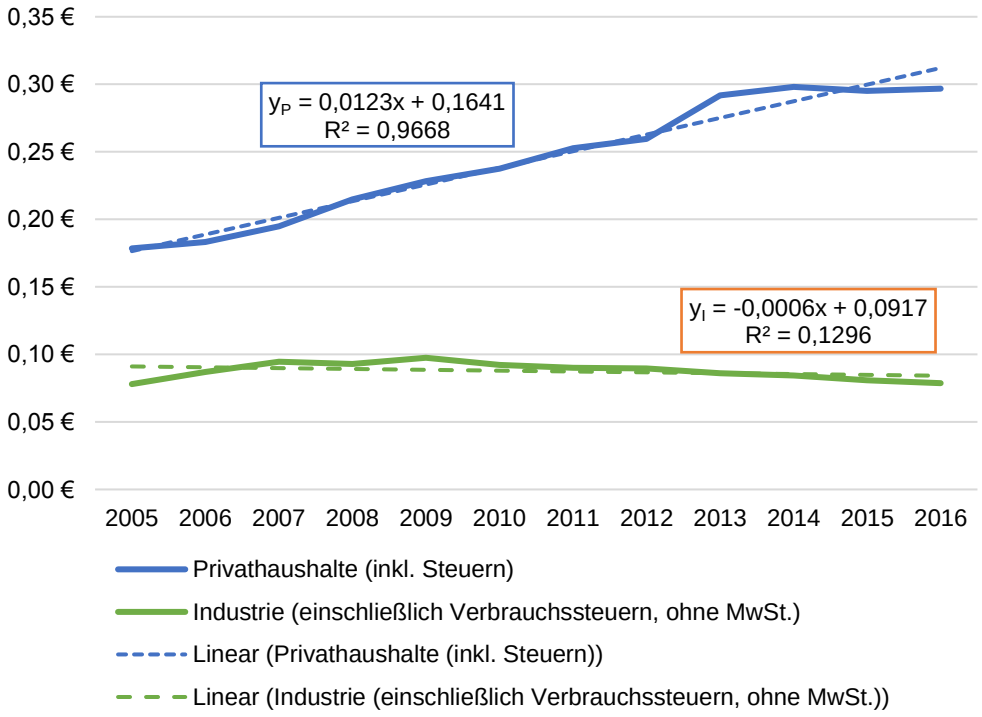


Abbildung 101: Kilowattstundenpreisentwicklung in Deutschland[51]

Da der Verlauf des Industriestrompreises als konstant angesehen wird, wird in diesem Modell der arithmetische Mittelwert der Vergangenheitswerte von 2005 bis 2016 gewählt. Dieser wird mit n = 12 wie folgt berechnet:

[51] Werte entnommen aus: Eurostat (2016)

$$\bar{e} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e_i = \frac{e_1 + e_2 + \cdots + e_{12}}{12} = 0{,}08765\ € / kWh \qquad (3\text{-}23)$$

Somit beträgt der industrielle Strompreis für diese Modellierung konstant $e = 0{,}08765€/kWh$.

Auch bei den Strompreisen soll die Validität der Prognose überprüft werden. Die Bundesregierung liefert lediglich eine Prognose über den Preis für Privathaushalte, die in diesem Modell nicht betrachtet werden. *Fraunhofer ISI* prognostiziert für 2020 einen gewerblichen Strompreis von 0,1236 € / kWh und liegt damit knapp vier Cent über den hier prognostizierten Wert.[52] Auch hier lässt sich die Abweichung erklären: *Fraunhofer ISI* nutzt für die Prognose Studien von *McKinsey* aus dem Jahr 2012. Somit führt das Alter der Studie zu Schwankungen in den Preisen. In der Flottenkosten-Modellierung für La Poste wurde der Strompreis analog zu dem hier verwendeten Ansatz ermittelt und ergab für Frankreich einen Strompreis in Höhe von 0,0554 € / kWh, der ebenfalls als konstant angenommen wird.[53]

Stromverbrauch

Der tatsächliche Verbrauch kann aufgrund von Ladeverlusten höher ausfallen als erwartet. Gründe für solche Ladeverluste können z.B. der Rückgang der Batteriekapazität aufgrund von Witterungsbedingungen oder Faktoren aus der Leistungselektronik sein. Eine Studie des *Wuppertal Instituts* aus dem Jahr 2007 hat ergeben, dass eine Abweichung von 10-30% vorliegt.[54]

Für den VW e-Golf ergab der *ADAC EcoTest* einen realen Stromverbrauch von 18,2 kWh / 100 km anstelle der vom Hersteller angegebenen 12,7 kWh / 100 km.[55] Somit wird in diesem Modell ein realer Stromverbrauch von 0,182 kWh / km angenommen.

Werkstattkosten

Werkstattkosten beinhalten u.a. Ölwechsel und Inspektionen, Verschleißreparaturen sowie Kosten für den Ersatz von Reifen. In der Modellierung für La Poste wird angenommen, dass Werkstattkosten für BEV im direkten Vergleich zu ICV aufgrund sich weniger bewegende Teile im Fahrzeug um 30% geringer ausfallen.[56] Diese Annahme ist kritisch zu sehen, da sie lediglich auf Prognosen aus dem Jahr 2012 basiert. Aus diesem Grund werden für die Werkstattkosten reale Daten aus der *ADAC Autodatenbank* verwendet.

[52] Vgl. Fraunhofer ISI (2014), S. 90

[53] Vgl. Kleindorfer et al. (2012), S. 14

[54] Vgl. Pehnt et al. (2007), S. 6

[55] Vgl. ADAC (2014), S. 12

[56] Vgl. Kleindorfer et al. (2012), S. 467

Für den VW Golf 1.6 TDI BMT Trendline ergibt sich z.B. anhand einer Laufzeit von 48 Monaten und einer Laufleistung von 15.000 km monatliche Werkstattkosten in Höhe von 44,00 € Brutto bzw. 36,97 € Netto. Die jährlichen Netto-Werkstattkosten betragen somit 443,70 €.

Im direkten Vergleich errechnen sich beim gleichen Nutzungsprofil für den VW e-Golf monatliche Werkstattkosten in Höhe von 41,00 € Brutto bzw. 34,45 € Netto. Folglich lauten die jährlichen Netto-Werkstattkosten für das Elektrofahrzeug 413,45 €. Hierbei wird erkenntlich, dass Werkstattkosten für BEV geringer ausfallen. Die Einsparung liegt hier jedoch bei knapp 7% anstatt der oben angenommenen 30%.

Fixkosten

Die Fixkosten beider Antriebsarten setzen sich aus der Kfz-Steuer, der jährlichen Versicherung und der HU/AU zusammen. Beim Elektrofahrzeug entfällt technologiebedingt die Abgasuntersuchung.

Kraftfahrzeugsteuer

Durch die Zulassung eines Fahrzeugs beginnt die Steuerpflicht der *Kraftfahrzeugsteuer*, auch *Kfz-Steuer* genannt, die jährlich anfällt. In diesem Modell wird angenommen, dass die Kfz-Steuer für Elektrofahrzeuge bis 2030 wegfällt. Dies wird mit dem stockenden Fortschritt der Ziele von einer Million Elektrofahrzeugen für 2020 bzw. von sechs Millionen für 2030 begründet. Um diese Zielsetzung zu erreichen, ist es notwendig, dass das Elektrofahrzeug in der TCO-Betrachtung im Vergleich zum Verbrenner mindestens gleichwertig ist. Daher ist davon auszugehen, dass die Bundesregierung in den nächsten Jahren bei der Verfehlung des Ziels für 2020 die Kfz-Steuer für Elektrofahrzeuge weiterhin erlässt.

Die Berechnung der Kfz-Steuer erfolgt anhand des Kfz-Steuerrechners des *Bundesministeriums für Finanzen*.[57] Hierbei stellen Fahrzeugart, Antriebsart, Hubraum und der CO_2-Wert die notwendigen Parameter dar. Für die Kfz-Steuer fällt keine Mehrwertsteuer an. In diesem Modell wird weiterhin angenommen, dass die Kfz-Steuer für den gesamten Betrachtungszeitraum konstant bleibt. Die Berechnungsgrundlage für den VW Golf 1.6 TDI BMT Trendline lautet daher wie folgt:

- **Fahrzeugart:** EZ ab 01.01.2014
- **Antriebsart:** Diesel
- **Hubraum:** 1598 ccm
- **CO_2-Wert:** 106 g/km
- **Kfz-Steuer:** 174 €

[57] Vgl. Bundesministerium für Finanzen (o.J.)

Versicherungskosten

Fixkosten enthalten ebenfalls die Versicherung eines Fahrzeuges. Die Kostenbestimmung orientierte sich primär an die *ADAC Autodatenbank*. Hierbei rechnet der *ADAC* die Haftpflicht- und Vollkaskoversicherung mit einem Beitragssatz von 50 % in die Fixkostenbetrachtung ein.

Anhand der *ADAC Autodatenbank* ergeben sich für den VW Golf 1.6 TDI BMT Trendline und den VW e-Golf eine Kostenstruktur nach Tabelle 33.

Tabelle 33: Versicherungstarife (ADAC (2016a), ADAC (2016b))[58]

	VW Golf 1.6 TDI BMT Trendline	VW e-Golf
Typklasse	16/18/21	17/20/21
Haftpflicht R6, 100 %	784 €	829 €
Vollkasko R4, 100 %, 500 € Selbstbeteiligung	854 €	1030 €
Teilkasko R7, 150 € Selbstbeteiligung	180 €	180 €

Aus diesen Werten werden analog zur Fixkostenbetrachtung des *ADAC* die jährlichen Versicherungskosten berechnet. Somit ergibt sich für ICV und den BEV bei einem Beitragssatz von 50% eine jährliche Versicherungspauschale von 819 € und 929,50 €.

Bei den Versicherungskosten fällt auf, dass das Elektrofahrzeug höhere Kosten verursacht. Die Kfz-Haftpflichtversicherung ist sowohl bei einem BEV als auch einem ICV gesetzlich vorgeschrieben, wohingegen eine Kaskoversicherung optional ist. Aus wirtschaftlicher Sicht ist der Abschluss einer Vollkaskoversicherung für BEV aufgrund der hohen Anschaffungskosten ratsam.

Haupt- und Abgasuntersuchung

Nach der *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO)* unterliegen untersuchungspflichtige Kraftfahrzeuge und Anhänger *Hauptuntersuchungen (HU)* in einem wiederkehrenden Intervall. Bei diesen wird ein Fahrzeug auf seine Verkehrssicherheit, seine Umweltverträglichkeit sowie auf die Einhaltung der für das Fahrzeug geltende Bau- und Wirkvorschriften kontrolliert. Neben der Hauptuntersuchung fällt zudem eine

[58] Die Tarife basieren auf den Normaltarifen der ADAC Autoversicherung ohne Sonderrabatte bei jährlicher Zahlung.

Untersuchung des Motormanagements und Abgasreinigungssystems (UMA)[59] an. Dabei gelten für Pkw folgende Untersuchungsintervalle[60]:

- 36 Monate nach der Erstzulassung,
- 24 Monate allgemein.

Für Elektrofahrzeuge entfällt technologiebedingt die Abgasuntersuchung, wohingegen Plug-In-Hybride mit dem Vollpreis belangt werden. Bei Anwendung des Modells wird angenommen, dass in den nächsten Jahren keine signifikante Kostensteigerung stattfindet. Aus der Gebührenliste des *TÜV Rheinland* wird ersichtlich, dass für eine HU und eine UMA für Pkw 53,50 € und 45,50 € respektive anfallen.[61]

3.1.20 AP 4620 Flottenspezifische Modellschätzung und Anwendung des Tools im Rahmen eines Workshops für Flottenbetreiber und –dienstleister

Ziele des Arbeitspakets 4620

Das Ziel des Arbeitspakets war die Anwendung des zuvor konzeptionierten Entscheidungsmodells, unter Einbeziehung von flottenspezifischen Nebenbedingungen und verschiedenen Zielfunktionen der Entscheider. Weiterhin sollten die Ergebnisse Praxisvertretern zugänglich gemacht werden.

Basissetting

Die Excel-Datei stellt ein Tool zur Bestimmung der Total Cost of Ownership bereit. Hierbei werden in einem Zeithorizont von 2017 bis 2027 die Kosten eines VW e-Golf gegenüber denen eines VW Golf 1.6 TDI BMT Trendline verglichen. Mit diesem Tool kann ein Fuhrparkmanager den Zeitpunkt feststellen, an dem ein Elektrofahrzeug dem Verbrenner von der Kostenseite her ebenbürtig ist. Um einen sehr präzisen Kostenvergleich zu erreichen, wird hier der Ansatz des Conversion Designs gewählt. In diesem Szenario wird angenommen, dass ein Fahrzeug angeschafft wird und nach Ablauf der Nutzungsdauer zum Restwert r verkauft wird.

Benutzereingabe

In der Benutzereingabe hat der Fuhrparkleiter die Möglichkeit, seine Beschaffungspolitik und das von ihm gewünschte Szenario genau zu definieren. Hierzu werden die geforderten Parameterwerte in Spalte B eingetragen. Die Benutzereingabe erfolgt in vier Schritten:

1. Anzahl der anzuschaffenden Fahrzeuge,

[59] Eine weitere geläufige Bezeichnung lautet: *Abgasuntersuchung (AU)*

[60] Vgl. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2012)

[61] Vgl. TÜV Rheinland (2016)

2. Laufzeit und -leistung,
3. Wahl einer konstanten Kaufprämie ab 2021,
4. Wahl eines Szenarios.

Anzahl der anzuschaffenden Fahrzeuge

Im ersten Schritt wählt der Fuhrparkleiter die Anzahl der anzuschaffenden Fahrzeuge für das jeweilige Jahr per manueller Eingabe aus (Tabelle 34).

Tabelle 34: Wahl der anzuschaffenden Fahrzeuge pro Jahr

1) Wählen Sie die Anzahl der benötigten Fahrzeuge für das entsprechende Jahr aus.	
Jahr	**Anzahl der Fahrzeuge**
2017	
2018	
2019	
2020	
2021	
2022	
2023	
2024	
2025	
2026	
2027	

Laufzeit und -leistung

Im zweiten Schritt wählt der Fuhrparkleiter per Dropdown-Liste die Laufzeit in Monaten und die Laufleistung in km pro Jahr aus (siehe Tabelle 35). Für die Laufzeit können Werte von 12, 24, 36 und 48 Monaten gewählt werden. Bei der Laufleistung ergeben sich Werte von 10.000 km, 15.000 km, 20.000 km, 25.000 km und 30.000 km.

Tabelle 35: Wahl der Laufzeit und -leistung

2) Wählen Sie die gewünschte Laufzeit in Monaten und die Laufleistung in km pro Jahr aus.	
Laufzeit in Monaten	**48**
Laufleistung in km pro Jahr	**15000**

Wahl einer konstanten Kaufprämie ab 2021

Die einmalige Kaufprämie für Elektrofahrzeuge in Höhe von 4.000 € soll nach aktuellem Stand 2020 auslaufen. Falls der Fuhrparkleiter ab 2021 den Einfluss einer potentiellen bis 2030 konstanten Kaufprämie betrachten möchte, so kann er im dritten Schritt manuell eine beliebige Prämie definieren, die in der Flottenkostenberechnung miteinfließt (Tabelle 36):

Tabelle 36: Wahl einer konstanten Kaufprämie ab 2021

3) Falls Sie annehmen möchten, dass die Kaufprämie für Elektrofahrzeuge über das Jahr 2020 fortgeführt wird bzw. werden sollte, so können Sie hier eine entsprechende Prämie definieren:	
Kaufprämie (einmalig beim Kauf)	**- €**

Wahl eines Szenarios

Im vierten und letzten Schritt soll der Einfluss von Unsicherheiten bei den Erwartungswerten für Batterie- und Dieselkraftstoffpreise untersucht werden. Hierzu kann der Fuhrparkleiter per Dropdown-Liste zwischen drei Szenarien wählen (

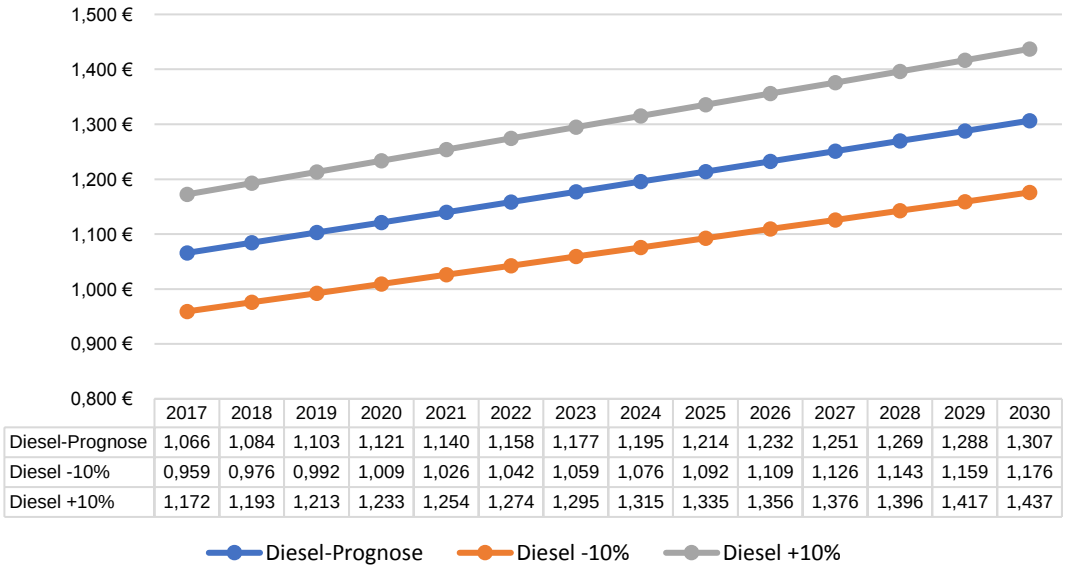
Tabelle 37):

- **Standardszenario,**
- **Optimistisches Szenario:** Batteriepreis -10%, Dieselpreis + 10%,
- **Pessimistisches Szenario:** Batteriepreis +10%, Dieselpreis -10%.

Tabelle 37: Wahl eines Szenarios

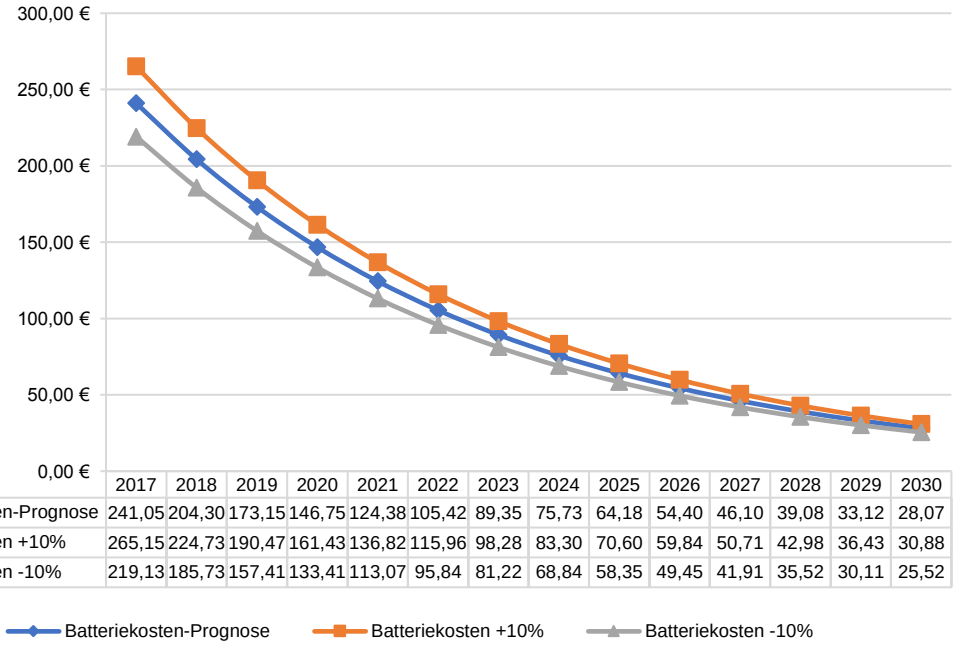
4) Sie haben zudem die Möglichkeit, Batterie- und Dieselpreisschwankungen durch ein (aus Sicht der Elektrofahrzeuge) optimistisches und pessimistisches Szenario zu prüfen.		
Standardszenario	Preise wie prognostiziert	
Optimistisches Szenario	Batteriepreis -10%	Dieselpreis +10%
Pessimistisches Szenario	Batteriepreis +10%	Dieselpreis -10%
Wählen Sie das entsprechende Szenario aus:		
	Standardszenario	

Die jeweiligen Auswirkungen des optimistischen und pessimistischen Szenarios auf den Dieselkraftstoffpreis und die Batteriekosten können aus Abbildung 102 und Abbildung 103 entnommen werden.



	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Diesel-Prognose	1,066	1,084	1,103	1,121	1,140	1,158	1,177	1,195	1,214	1,232	1,251	1,269	1,288	1,307
Diesel -10%	0,959	0,976	0,992	1,009	1,026	1,042	1,059	1,076	1,092	1,109	1,126	1,143	1,159	1,176
Diesel +10%	1,172	1,193	1,213	1,233	1,254	1,274	1,295	1,315	1,335	1,356	1,376	1,396	1,417	1,437

Abbildung 102: Auswirkungen der Szenarien auf den Dieselkraftstoffpreis pro Liter



	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Batteriekosten-Prognose	241,05	204,30	173,15	146,75	124,38	105,42	89,35	75,73	64,18	54,40	46,10	39,08	33,12	28,07
Batteriekosten +10%	265,15	224,73	190,47	161,43	136,82	115,96	98,28	83,30	70,60	59,84	50,71	42,98	36,43	30,88
Batteriekosten -10%	219,13	185,73	157,41	133,41	113,07	95,84	81,22	68,84	58,35	49,45	41,91	35,52	30,11	25,52

Abbildung 103: Auswirkungen der Szenarien auf die Batteriekosten pro kWh

Ergebnisdarstellung - Basisannahmen

Nach der oben beschriebenen Benutzereingabe erfolgt die Berechnung der TCO und Flottenkosten. Hierzu werden jeweils für ICV und BEV die TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr in einer Tabelle dargestellt. Die hellblauen und orangen Kurven stellen die TCO des ICV respektive die des BEV dar. Beispielhaft sollen hier die Ergebnisse des ICV für das Jahr 2017 und 2018 dargestellt werden (Tabelle 38):

Tabelle 38: Beispielhafte Darstellung der TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr für Verbrenner

Jahr	**2017**	**2018**
Zeit	0	1
Anzuschaffende Fahrzeuge	1	1
Nettolistenpreis / Anschaffungspreis	19.411,76 €	19.863,86 €
Laufzeit in Monaten	48	48
Laufleistung in km	15000	15000
Diskontierungsfaktor	1	0,99009901
Wertverlust	9.501,47 €	9.823,16 €
Restwert	9.910,30 €	10.040,70 €
Variable Kosten	1.374,36 €	1.390,53 €
Kraftstoffkosten	930,66 €	946,84 €
Kraftstoffpreis pro l	1,066 €	1,084 €
Kraftstoffverbrauch in l pro km	0,05822	0,05822
Werkstattkosten	443,70 €	443,70 €
Fixkosten	1.092,00 €	1.092,00 €
Kfz-Steuer	174,00 €	174,00 €
Versicherung	819,00 €	819,00 €
HU/AU	99,00 €	99,00 €
Total Cost of Ownership pro Fahrzeug	19.025,03 €	19.118,88 €
pro Monat	396,35 €	398,31 €
Total Cost of Ownership gesamt	19.025,03 €	19.118,88 €
pro Monat	396,35 €	398,31 €

In der ersten Spalte sind alle zuvor beschriebenen Parameter wiederzufinden. Die TCO werden unten sowohl pro Fahrzeug als auch insgesamt dargestellt. In diesem Fall stimmen die Werte überein, da lediglich ein Fahrzeug in der jeweiligen Periode angeschafft wird. Alle Parameterwerte ergeben sich aus der Parameterdiskussion in diesem Arbeitspaket.

Unterhalb der Berechnungstabellen befinden sich drei Tabellen, die den direkten Vergleich der TCO unterteilt nach Antriebsart ermöglichen. Diese Tabellen geben drei Kostenbetrachtungsarten wider:

- TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr,
- Gesamte TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr
- TCO bei der Beschaffung einer Antriebsart über den gesamten Zeithorizont.

Abbildung 104 zeigt die zeitliche Entwicklung der TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr mit den obigen Werten. Aus dieser Abbildung wird deutlich, wann der Break-Even-Point eines VW e-Golfs

erreicht wird. In diesem Fall wird das Elektrofahrzeug im Jahr 2019 kostengünstiger sein. Durch den Ablauf der Kaufprämie für Elektrofahrzeuge im Jahr 2020 wird der Verbrenner ab 2021 wieder günstiger. Anschließend wird im Jahr 2024 erneut der Break-Even-Point erreicht und das Elektrofahrzeug bleibt bis zum Ende des Planungshorizonts kostengünstiger.

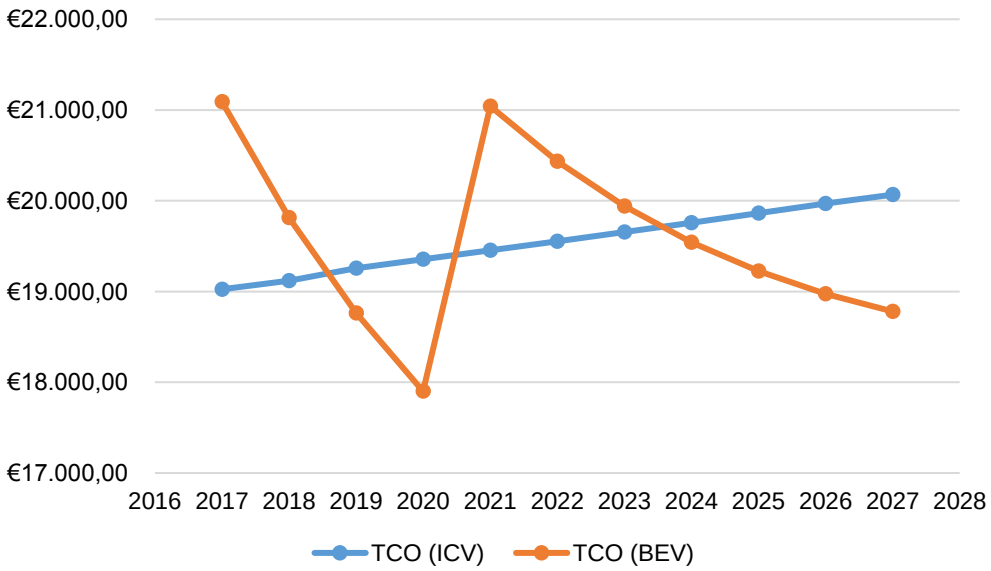


Abbildung 104: TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr mit l=48 und s=15.000

Abbildung 105 stellt die TCO bei der Beschaffung einer Antriebsart über den gesamten Zeithorizont dar. Hierbei wurden beispielhaft $n = 1$, Anschaffungszeitpunkte 2017, 2021 und 2025, $l = 48$ und $s = 15.000$ gewählt. Diese Darstellung zeigt die TCO der nicht-optimalen Beschaffungspolitiken. In diesem Beispiel wird sichtbar, dass die TCO bei der reinen Beschaffung von Elektrofahrzeugen im gesamten Planungshorizont höher ausfallen würden.

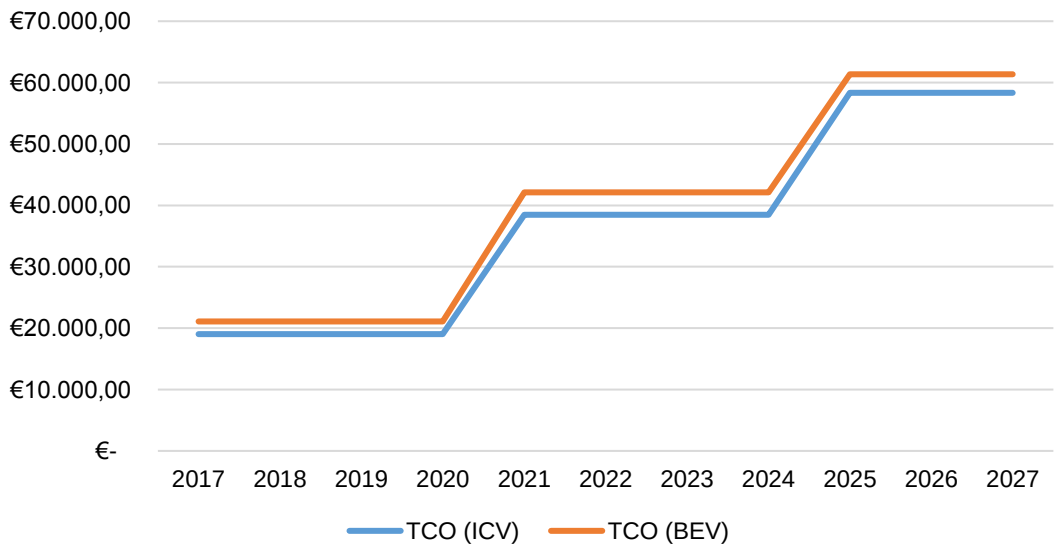


Abbildung 105: TCO bei der Beschaffung einer Antriebsart über den gesamten Zeithorizont mit $n = 1$, Anschaffungszeitpunkten 2017, 2021 und 2025, $l = 48$ und $s = 15.000$

Anschließend wird die optimale Beschaffungspolitik mit den optimalen gesamten Flottenkosten durch das Tool ausgewiesen. Im letzten Schritt wird zudem das Einsparungspotential einer optimalen Beschaffungspolitik im Vergleich zu den Beschaffungspolitiken einer einzigen Antriebsart (nur ICV oder nur BEV) über den gesamten Zeithorizont aufgezeigt.

Prognoseszenarien

Im Folgenden werden drei Szenarien verglichen, um Auswirkungen von Unsicherheiten im Hinblick auf den Dieselkraftstoff- und Batteriepreis zu verdeutlichen:

- **Standardszenario,**
- **Optimistisches Szenario**: Batteriepreis -10%, Dieselpreis + 10%,
- **Pessimistisches Szenario**: Batteriepreis +10%, Dieselpreis -10%.

Es soll gezeigt werden, dass unterschiedliche Szenarien ebenfalls unterschiedliche Auswirkungen auf den Break-Even-Point haben können. Bei allen Szenarien werden folgende Parameter anhand des Standard-Nutzungsprofils angenommen:

- $\forall t : n = 1,$
- $l = 36,$
- $s = 15.000.$

Szenario 1: Standardszenario

Das Standardszenario ergibt sich aus den zuvor prognostizierten Dieselkraftstoff- und Batteriepreisen. Somit ergeben sich die TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr in transponierter Darstellung gemäß Tabelle 39.

Tabelle 39: Szenario 1 – TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr

t	TCO_{I^t}	TCO_{E^t}	Delta
2017	15.515,44 €	18.308,15 €	2.792,71 €
2018	15.601,65 €	17.030,12 €	1.428,48 €
2019	15.738,27 €	15.976,97 €	238,70 €
2020	15.827,55 €	15.112,80 €	- 714,75 €
2021	15.918,10 €	18.251,42 €	2.333,32 €
2022	16.009,95 €	17.641,67 €	1.631,72 €
2023	16.103,11 €	17.144,70 €	1.041,59 €
2024	16.197,61 €	16.742,72 €	545,10 €
2025	16.293,49 €	16.420,81 €	127,31 €
2026	16.390,77 €	16.166,44 €	- 224,33 €
2027	16.489,48 €	15.969,11 €	- 520,36 €

Abbildung 106 zeigt die grafische Darstellung der TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr:

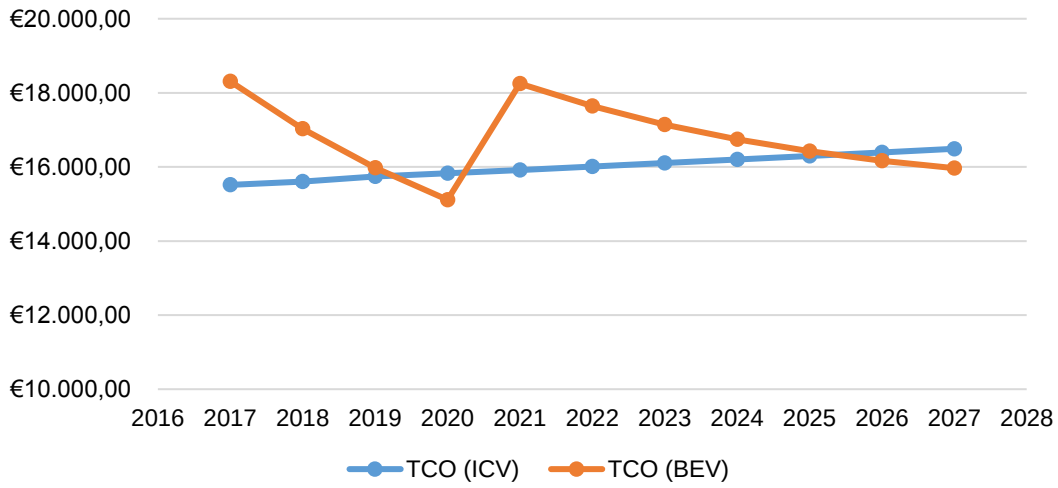


Abbildung 106: Szenario 1 – TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr

Bei der Beschaffung einer Antriebsart über den gesamten Zeithorizont ergeben sich die TCO gemäß Tabelle 40.

Tabelle 40: Szenario 1 – TCO bei der Beschaffung einer Antriebsart über den gesamten Zeithorizont

t	$\sum TCO_{I^t}$	$\sum TCO_{E^t}$	Delta
2017	15.515,44 €	18.308,15 €	2.792,71 €
2018	31.117,09 €	35.338,28 €	4.221,19 €
2019	46.855,36 €	51.315,25 €	4.459,89 €
2020	62.682,91 €	66.428,05 €	3.745,14 €
2021	78.601,01 €	84.679,47 €	6.078,46 €
2022	94.610,96 €	102.321,14 €	7.710,18 €
2023	110.714,06 €	119.465,83 €	8.751,77 €
2024	126.911,68 €	136.208,55 €	9.296,87 €
2025	143.205,17 €	152.629,36 €	9.424,18 €
2026	159.595,94 €	168.795,79 €	9.199,85 €
2027	176.085,42 €	184.764,91 €	8.679,49 €

Für die optimale Beschaffungspolitik werden jedes Jahr die TCO beider Antriebsarten miteinander verglichen und das Minimum gewählt. Anschließend werden die minimalen TCO über den gesamten Zeithorizont summiert, was zu den optimalen gesamten Flottenkosten G^0 führt. Die optimale Beschaffungspolitik für das Szenario 1 wird in Tabelle 41 dargestellt.

Tabelle 41: Szenario 1 – Optimale Beschaffungspolitik

t	optimale TCO pro Periode $\min[TCO_{I^t}, TCO_{E^t}]$	optimale Antriebsart pro Periode
2017	15.515,44 €	ICV
2018	15.601,65 €	ICV
2019	15.738,27 €	ICV
2020	15.112,80 €	BEV
2021	15.918,10 €	ICV

2022	16.009,95 €	ICV
2023	16.103,11 €	ICV
2024	16.197,61 €	ICV
2025	16.293,49 €	ICV
2026	16.166,44 €	BEV
2027	15.969,11 €	BEV
Optimale gesamte Flottenkosten G^0	**174.625,97 €**	

2020, 2026 und 2027 stellt das BEV die kostengünstigere Antriebsart dar; für alle anderen Perioden ist die TCO des ICV minimal. Die optimalen gesamten Flottenkosten G^0 mit $\forall t: n = 1$ lauten somit:

$$G^0(k_D,\ B) = \sum_{t=0}^{T} n^t \cdot \min[TCO_{I^t}, TCO_{E^t}] = 174.625{,}97\ € \qquad (3\text{-}24)$$

Das Einsparungspotential durch diese Modellierung beträgt im Vergleich zur reinen ICV- und BEV-Beschaffung 1.459,45 € (0,83%) und 10.138,94 € (5,49%) (Tabelle 42).

Tabelle 42: Szenario 1 – Einsparungspotential gegenüber der Beschaffung nur einer Antriebsart

nur ICV	**176.085,42 €**	**- 1.459,45 €**	**0,83%**
nur BEV	**184.764,91 €**	**- 10.138,94 €**	**5,49%**

Szenario 2: Pessimistisches Szenario

Im pessimistischen Szenario wird angenommen, dass die Batteriepreise um 10% höher und die Dieselpreise um 10% geringer ausfallen werden. Die TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr sind in Tabelle 43 abzulesen.

Tabelle 43: Szenario 2 – TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr

t	TCO_{I^t}	TCO_{E^t}	Delta
2017	15.234,23 €	19.171,10 €	3.936,88 €
2018	15.318,46 €	17.754,27 €	2.435,82 €
2019	15.453,17 €	16.584,64 €	1.131,47 €

2020	15.540,61 €	15.622,73 €	82,12 €
2021	15.629,39 €	18.679,33 €	3.049,94 €
2022	15.719,52 €	18.000,75 €	2.281,23 €
2023	15.811,03 €	17.446,02 €	1.635,00 €
2024	15.903,94 €	16.995,58 €	1.091,63 €
2025	15.998,29 €	16.632,99 €	634,70 €
2026	16.094,10 €	16.344,50 €	250,40 €
2027	16.191,39 €	16.118,53 €	- 72,86 €

Abbildung 107 zeigt die grafische Darstellung der TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr:

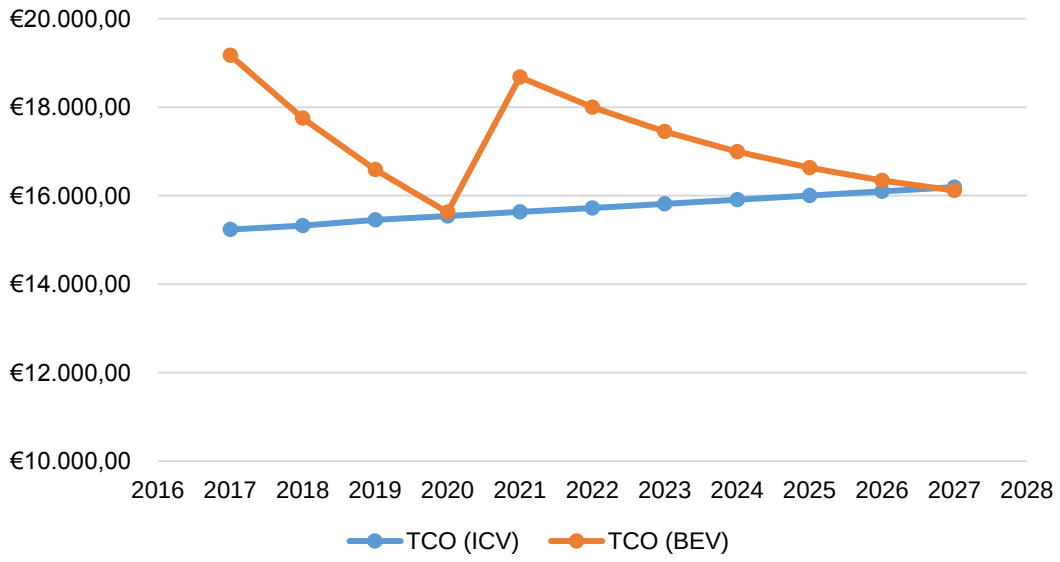


Abbildung 107: Szenario 2 – TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr

Bei der Beschaffung einer Antriebsart über den gesamten Zeithorizont ergeben sich die TCO nach Tabelle 44.

Tabelle 44: Szenario 2 – TCO bei der Beschaffung einer Antriebsart über den gesamten Zeithorizont

t	$\sum TCO_{I^t}$	$\sum TCO_{E^t}$	Delta
2017	15.234,23 €	19.171,10 €	3.936,88 €
2018	30.552,68 €	36.925,38 €	6.372,69 €
2019	46.005,85 €	53.510,02 €	7.504,16 €

2020	61.546,47 €	69.132,75 €	7.586,28 €
2021	77.175,85 €	87.812,08 €	10.636,22 €
2022	92.895,37 €	105.812,83 €	12.917,46 €
2023	108.706,40 €	123.258,85 €	14.552,46 €
2024	124.610,34 €	140.254,43 €	15.644,09 €
2025	140.608,63 €	156.887,42 €	16.278,79 €
2026	156.702,73 €	173.231,92 €	16.529,19 €
2027	172.894,13 €	189.350,45 €	16.456,33 €

Die optimale Beschaffungspolitik wird analog zum ersten Szenario für Szenario 2 in Tabelle 45 dargestellt.

Tabelle 45: Szenario 2 – Optimale Beschaffungspolitik

t	**optimale TCO pro Periode** $\min[TCO_{I^t}, TCO_{E^t}]$	**optimale Antriebsart pro Periode**
2017	15.234,23 €	ICV
2018	15.318,46 €	ICV
2019	15.453,17 €	ICV
2020	15.540,61 €	ICV
2021	15.629,39 €	ICV
2022	15.719,52 €	ICV
2023	15.811,03 €	ICV
2024	15.903,94 €	ICV
2025	15.998,29 €	ICV
2026	16.094,10 €	ICV
2027	16.118,53 €	BEV
Optimale gesamte Flottenkosten G^0	**172.821,27 €**	

Lediglich 2027 stellt das BEV die kostengünstigere Antriebsart dar; für alle anderen Perioden ist die TCO des ICV minimal. Die optimalen gesamten Flottenkosten G^0 lauten somit:

$$G^0(k_D,\ B) = \sum_{t=0}^{T} n^t \cdot \min[TCO_I t, TCO_E t] = 172.821{,}27\ € \qquad (3\text{-}25)$$

Das Einsparungspotential durch diese Modellierung beträgt im Vergleich zur reinen ICV- und BEV-Beschaffung 72,86 € (0,04%) respektive 16.529,19 € (8,73%) (Tabelle 46):

Tabelle 46: Szenario 2 – Einsparungspotential gegenüber der Beschaffung nur einer Antriebsart

nur ICV	**172.894,13 €**	**- 72,86 €**	**0,04%**
nur BEV	**189.350,45 €**	**- 16.529,19 €**	**8,73%**

Szenario 3: Optimistisches Szenario

Im optimistischen Szenario wird angenommen, dass die Batteriepreise um 10% geringer und die Dieselpreise um 10% höher ausfallen werden. Die TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr sind in Tabelle 47 aufgeführt:

Tabelle 47: Szenario 3 – TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr

t	TCO_{I^t}	TCO_{E^t}	Delta
2017	15.796,66 €	17.523,66 €	1.727,00 €
2018	15.884,84 €	16.371,81 €	486,97 €
2019	16.023,36 €	15.424,54 €	- 598,82 €
2020	16.114,49 €	14.649,23 €	- 1.465,26 €
2021	16.206,82 €	17.862,41 €	1.655,59 €
2022	16.300,37 €	17.315,23 €	1.014,85 €
2023	16.395,19 €	16.870,76 €	475,58 €
2024	16.491,29 €	16.512,84 €	21,56 €
2025	16.588,69 €	16.227,91 €	- 360,79 €
2026	16.687,44 €	16.004,57 €	- 682,88 €
2027	16.787,56 €	15.833,28 €	- 954,28 €

Abbildung 108 zeigt die grafische Darstellung der TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr.

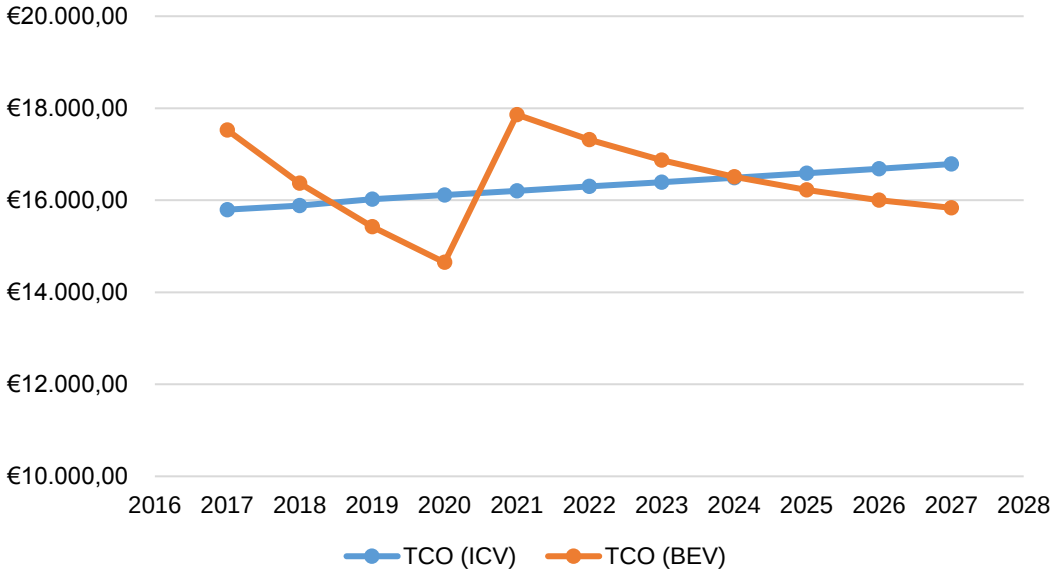


Abbildung 108: Szenario 3 – TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr

Bei der Beschaffung einer Antriebsart über den gesamten Zeithorizont ergeben sich die TCO nach Tabelle 48.

Tabelle 48: Szenario 3 – TCO bei der Beschaffung einer Antriebsart über den gesamten Zeithorizont

t	$\sum TCO_{I^t}$	$\sum TCO_{E^t}$	Delta
2017	15.796,66 €	17.523,66 €	1.727,00 €
2018	31.681,49 €	33.895,46 €	2.213,97 €
2019	47.704,86 €	49.320,00 €	1.615,15 €
2020	63.819,35 €	63.969,23 €	149,88 €
2021	80.026,17 €	81.831,64 €	1.805,48 €
2022	96.326,54 €	99.146,87 €	2.820,33 €
2023	112.721,73 €	116.017,63 €	3.295,91 €
2024	129.213,01 €	132.530,48 €	3.317,47 €
2025	145.801,71 €	148.758,39 €	2.956,68 €
2026	162.489,15 €	164.762,95 €	2.273,80 €
2027	179.276,71 €	180.596,23 €	1.319,52 €

Die optimale Beschaffungspolitik für Szenario 3 ist in Tabelle 49 dargestellt.

Tabelle 49: Szenario 3 – Optimale Beschaffungspolitik

Jahr	**optimale TCO pro Periode** $\min[TO_{I^t}, TCO_{E^t}]$	**optimale Antriebsart pro Periode**
2017	15.796,66 €	ICV
2018	15.884,84 €	ICV
2019	15.424,54 €	BEV
2020	14.649,23 €	BEV
2021	16.206,82 €	ICV
2022	16.300,37 €	ICV
2023	16.395,19 €	ICV
2024	16.491,29 €	ICV
2025	16.227,91 €	BEV
2026	16.004,57 €	BEV
2027	15.833,28 €	BEV
Optimale gesamte Flottenkosten G^0	**175.214,68 €**	

2019, 2020, 2025, 2026 und 2027 stellt das BEV die kostengünstigere Antriebsart dar; für alle anderen Perioden ist die TCO des ICV minimal. Die optimalen gesamten Flottenkosten G^0 lauten somit:

$$G^0(k_D,\ B) = \sum_{t=0}^{T} n^t \cdot \min[TCO_{I^t}, TCO_{E^t}] = 175.214{,}68\ € \qquad (3\text{-}26)$$

Das Einsparungspotential durch diese Modellierung beträgt im Vergleich zur reinen ICV- und BEV-Beschaffung 4.062,03 € (2,27%) respektive 5.381,55 € (2,98%) (Tabelle 50):

Tabelle 50: Szenario 3 – Einsparungspotential gegenüber der Beschaffung nur einer Antriebsart

nur ICV	**179.276,71 €**	**- 4.062,03 €**	**2,27%**
nur BEV	**180.596,23 €**	**- 5.381,55 €**	**2,98%**

Ergebnisinterpretation der Szenario-Analysen

Aus den zuvor berechneten TCO für die drei Szenarien mit dem Standardnutzungsprofil ergeben sich die optimalen Beschaffungspolitiken gemäß Tabelle 51.

Tabelle 51: Optimale Beschaffungspolitik der drei Szenarien

t	Szenario 1 Standardszenario	Szenario 2 pessimistisches Szenario	Szenario 3 optimistisches Szenario
2017	**ICV**	**ICV**	**ICV**
2018	**ICV**	**ICV**	**ICV**
2019	**ICV**	**ICV**	**BEV**
2020	**BEV**	**ICV**	**BEV**
2021	**ICV**	**ICV**	**ICV**
2022	**ICV**	**ICV**	**ICV**
2023	**ICV**	**ICV**	**ICV**
2024	**ICV**	**ICV**	**ICV**
2025	**ICV**	**ICV**	**BEV**
2026	**BEV**	**ICV**	**BEV**
2027	**BEV**	**BEV**	**BEV**
G^0	**174.625,97 €**	**172.821,27 €**	**175.214,68 €**

Im Standardszenario ist erkennbar, dass sich bereits 2020 das BEV rentiert, dies aber durch die auslaufende Prämie bereits 2021 nicht mehr der Fall ist. Erst ab dem Jahr 2026 wird der Break-Even-Point erreicht. Im pessimistischen Szenario wird dieser durch die Kaufprämie nicht erreicht. Erst zum Ende des Planungshorizonts lohnt sich die Anschaffung eines BEV. Im optimistischen Szenario wird bereits 2019 das BEV kostengünstiger. Ähnlich wie beim Standardszenario führt die auslaufende Kaufprämie dazu,

dass sich das BEV vorübergehend nicht mehr rentiert. Hier wird der Break-Even-Point im Jahr 2025 erreicht.

Dies zeigt, dass der Anreiz einer Kaufprämie einen erheblichen Einfluss auf Kaufentscheidung bzw. die optimale Flottenstrategie haben kann. Eine auslaufende Prämie würde somit aus Kostengründen den Fortschritt der Elektromobilität in Flotten stoppen.

Des Weiteren ist eine Veränderung in den optimalen Flottenkosten G^0 anzumerken. Durch die günstigen Dieselkraftstoffkosten im pessimistischen Szenario fällt auch G^0 mit 172.821,27 € (- 1.804,70 €) geringer aus. Im Gegensatz dazu führt ein optimistisches Szenario dazu, dass die Flottenkosten mit 175.214,68 € (+ 588,71 €) insgesamt höher ausfallen. Die Abweichung wirkt – über den gesamten Planungshorizont betrachtet – in beiden Fällen zunächst gering; in diesem Fall wurde jedoch in jedem Jahr eine Fahrzeuganschaffung angenommen. Eine große Flotte kann somit den Effekt auf einen fünfstelligen Betrag hochskalieren.

Weiterhin ist zu erwähnen, dass sich in keinem der drei Szenarien die reine Anschaffung von BEV über den gesamten Planungshorizont rentieren würde. Obwohl selbst im optimistischen Szenario das BEV in fünf Jahren kostengünstiger ist, dominiert das ICV in der Summe.

Somit hat ein Fuhrparkleiter zwei Optionen: Die Fahrzeuganschaffung für den gesamten Planungshorizont bereits heute zu definieren oder jedes Jahr eine neue Entscheidung zu treffen. Im ersten Fall wird er sich für die Anschaffung von ICV entscheiden; im zweiten Fall wird er sich an der optimalen Beschaffungspolitik aus der vorherigen Tabelle orientieren.

Sensitivität der Laufzeit und -leistung

Nachdem der Einfluss potentieller Unsicherheiten in Diesel- und Batteriepreisen untersucht wurde, wird hier aufgezeigt, welche Auswirkungen durch sowohl Laufzeit- als auch Laufleistungsveränderungen auf die TCO entstehen. Hierbei wird vom Standardnutzungsprofil mit $l = 36$ und $s = 15.000$ ausgegangen. Für die Analyse wird einer der beiden Parameter konstant gehalten, während der andere verändert wird.

Änderung der Laufzeit

Hier wird die Laufleistung mit $s = 15.000$ als konstant angesehen, wohingegen die Laufzeit l variiert wird. Es werden Laufzeiten von 12, 24, 36 und 48 Monaten betrachtet. Tabelle 52 zeigt die TCO pro Anschaffungsjahr pro Antriebsart mit verschieden gewählter Laufzeit:

Tabelle 52: Auswirkungen der Laufzeitveränderungen auf die TCO bei konstanter Laufleistung

	48 Monate, 15.000 km			36 Monate, 15.000 km		
t	TCO_{I^t}	TCO_{E^t}	Delta	TCO_{I^t}	TCO_{E^t}	Delta
2017	19.025,03 €	21.090,83 €	2.065,80 €	15.515,44 €	18.308,15 €	2.792,71 €
2018	19.118,88 €	19.814,00 €	695,12 €	15.601,65 €	17.030,12 €	1.428,48 €
2019	19.258,11 €	18.762,41 €	- 495,69 €	15.738,27 €	15.976,97 €	238,70 €
2020	19.355,24 €	17.900,18 €	- 1.455,05 €	15.827,55 €	15.112,80 €	- 714,75 €
2021	19.453,76 €	21.041,11 €	1.587,35 €	15.918,10 €	18.251,42 €	2.333,32 €
2022	19.553,72 €	20.434,04 €	880,32 €	16.009,95 €	17.641,67 €	1.631,72 €
2023	19.655,13 €	19.940,11 €	284,98 €	16.103,11 €	17.144,70 €	1.041,59 €
2024	19.758,04 €	19.541,56 €	- 216,48 €	16.197,61 €	16.742,72 €	545,10 €
2025	19.862,47 €	19.223,44 €	- 639,03 €	16.293,49 €	16.420,81 €	127,31 €
2026	19.968,46 €	18.973,25 €	- 995,21 €	16.390,77 €	16.166,44 €	- 224,33 €
2027	20.067,18 €	18.780,48 €	- 1.286,70 €	16.489,48 €	15.969,11 €	- 520,36 €
	24 Monate, 15.000 km			**12 Monate, 15.000 km**		
t	TCO_{I^t}	TCO_{E^t}	Delta	TCO_{I^t}	TCO_{E^t}	Delta
2017	11.975,97 €	15.486,25 €	3.510,28 €	8.406,36 €	12.624,60 €	4.218,24 €
2018	12.054,14 €	14.206,85 €	2.152,71 €	8.476,12 €	11.343,67 €	2.867,56 €
2019	12.187,88 €	13.151,96 €	964,08 €	8.606,69 €	10.286,87 €	1.680,18 €
2020	12.268,95 €	12.285,68 €	16,73 €	8.679,16 €	9.418,30 €	739,14 €
2021	12.351,15 €	15.421,81 €	3.070,67 €	8.752,63 €	12.551,77 €	3.799,14 €
2022	12.434,50 €	14.809,20 €	2.374,70 €	8.827,10 €	11.936,10 €	3.109,00 €
2023	12.519,03 €	14.308,99 €	1.789,96 €	8.902,61 €	11.432,46 €	2.529,85 €
2024	12.604,75 €	13.903,39 €	1.298,64 €	8.979,16 €	11.023,04 €	2.043,88 €
2025	12.691,69 €	13.577,47 €	885,78 €	9.056,77 €	10.692,92 €	1.636,15 €
2026	12.779,87 €	13.318,72 €	538,85 €	9.135,45 €	10.429,57 €	1.294,12 €
2027	12.869,31 €	13.116,63 €	247,32 €	9.215,24 €	10.222,49 €	1.007,25 €

Änderung der Laufleistung

Im zweiten Schritt wird angenommen, dass die Laufzeit mit $l = 36$ konstant bleibt und die Laufleistung s variiert. Es werden Laufleistungen von 10.000 km, 15.000 km, 20.000 km und 25.000 km betrachtet. Tabelle 53 zeigt die TCO pro Anschaffungsjahr pro Antriebsart mit verschieden gewählter Laufleistung:

Tabelle 53: Auswirkungen der Laufleistungsveränderungen auf die TCO bei konstanter Laufzeit

	36 Monate, 25.000 km			36 Monate, 20.000 km		
t	TCO_{I^t}	TCO_{E^t}	**Delta**	TCO_{I^t}	TCO_{E^t}	**Delta**
2018	18.299,32 €	18.366,20 €	66,87 €	16.950,48 €	17.698,16 €	747,68 €
2019	18.455,76 €	17.319,80 €	- 1.135,96 €	17.097,01 €	16.648,39 €	- 448,63 €
2020	18.568,07 €	16.462,59 €	- 2.105,48 €	17.197,81 €	15.787,69 €	- 1.410,12 €
2021	18.681,36 €	19.608,37 €	927,01 €	17.299,73 €	18.929,89 €	1.630,16 €
2022	18.795,66 €	19.005,97 €	210,31 €	17.402,80 €	18.323,82 €	921,02 €
2023	18.911,01 €	18.516,55 €	- 394,46 €	17.507,06 €	17.830,63 €	323,57 €
2024	19.027,45 €	18.122,33 €	- 905,11 €	17.612,53 €	17.432,52 €	- 180,00 €
2025	19.145,00 €	17.808,38 €	- 1.336,62 €	17.719,25 €	17.114,59 €	- 604,65 €
2026	19.263,71 €	17.562,18 €	- 1.701,53 €	17.827,24 €	16.864,31 €	- 962,93 €
2027	19.383,62 €	17.373,24 €	- 2.010,38 €	17.936,55 €	16.671,18 €	- 1.265,37 €
	36 Monate, 15.000 km			**36 Monate, 10.000 km**		
t	TCO_{I^t}	TCO_{E^t}	**Delta**	TCO_{I^t}	TCO_{E^t}	**Delta**
2017	15.515,44 €	18.308,15 €	2.792,71 €	14.444,85 €	17.643,40 €	3.198,55 €
2018	15.601,65 €	17.030,12 €	1.428,48 €	14.252,81 €	16.362,09 €	2.109,28 €
2019	15.738,27 €	15.976,97 €	238,70 €	14.379,52 €	15.305,55 €	926,03 €
2020	15.827,55 €	15.112,80 €	- 714,75 €	14.457,29 €	14.437,90 €	- 19,39 €
2021	15.918,10 €	18.251,42 €	2.333,32 €	14.536,47 €	17.572,95 €	3.036,47 €
2022	16.009,95 €	17.641,67 €	1.631,72 €	14.617,09 €	16.959,52 €	2.342,43 €
2023	16.103,11 €	17.144,70 €	1.041,59 €	14.699,16 €	16.458,77 €	1.759,61 €
2024	16.197,61 €	16.742,72 €	545,10 €	14.782,70 €	16.052,91 €	1.270,21 €
2025	16.293,49 €	16.420,81 €	127,31 €	14.867,74 €	15.727,02 €	859,28 €
2026	16.390,77 €	16.166,44 €	- 224,33 €	14.954,30 €	15.468,57 €	514,26 €
2027	16.489,48 €	15.969,11 €	- 520,36 €	15.042,41 €	15.267,05 €	224,65 €

Ergebnisinterpretation – Sensitivität der Laufzeit und -leistung

Die folgenden Interpretationen beziehen sich auf die zuvor in Tabellenform dargestellten Ergebnisse aus Sensitivitätsanalysen anhand der Variation der Modellparameter Laufzeit und -leistung.

Betrachtet man zunächst eine konstante Laufleistung von 15.000 km und eine variierende Laufzeit, so ist festzustellen, dass sich bei einer Laufzeit von weniger als zwei Jahren die Anschaffung eines BEV in keinem Jahr rentiert. Erst ab einer Laufzeit von drei Jahren wird es 2020 um 714,75 € günstiger, jedoch wird es durch die auslaufende Prämie ab 2021 wieder 2.333,32 € teurer. Im Jahr 2026 wird der Break-Even-Point erreicht.

Bei einer Laufzeit von vier Jahren wird das BEV bereits 2019 um 495,69 € günstiger. 2020 steht es um 1.455,05 € besser dar. Auch hier wird es durch die auslaufende Prämie ab 2021 wieder um 1.587,35 € teurer. In diesem Fall wird der Break-Even-Point bereits 2024 erreicht. Eine höhere Laufzeit führt dazu führt, dass das BEV in der TCO-Betrachtung günstiger wird.

Bei der Betrachtung einer variierenden Laufleistung wird erkennbar, dass bei einer Laufleistung von 10.000 km lediglich im Jahr 2020 mit 19,39 € ein Break-Even erreicht wird. Im weiteren Verlauf bleibt das BEV teurer. Mit einer Laufleistung von 15.000 km wird es 2020 mit 714,75 € günstiger. Daraufhin fallen die TCO wieder höher aus, bis 2026 der Break-Even-Point erreicht wird.

Eine Laufleistung von 20.000 km führt dazu, dass die TCO bereits 2019 mit 448,63 € unter denen von ICV liegen. 2020 beträgt die Abweichung bereits 1.410,12 €. Die auslaufende Prämie führt auch hier dazu, dass die Kosten wieder über denen eines ICV liegen. Ab 2024 wird der Break-Even-Point erreicht.

Bei einer Laufleistung von 25.000 km liegen die TCO eines BEV ebenfalls schon 2019 mit 1.135,96 € unter denen eines ICV. 2020 beträgt der Unterschied 2.105,48 €. Wie in allen anderen Fällen ist das BEV ab 2021 teurer. Der Break-Even-Point wird hier früher im Jahr 2024 erreicht. Hier wird deutlich, dass eine höhere Laufleistung dazu führt, dass das BEV kostengünstiger ausfällt.

Aus der Sensitivitätsanalyse lässt sich Folgendes erschließen: Je höher die Laufzeit und -leistung eines BEV sind, desto eher rentiert es sich im Vergleich zum ICV. Dieser Effekt folgt aufgrund linear steigenden Dieselkosten und exponentiell fallenden Batteriekosten. Weiterhin stellt sich heraus, dass der Verlust der Prämie ab 2021 in allen Fällen dazu führt, dass das BEV in der TCO-Betrachtung teurer ausfällt. Daraus lässt sich schließen, dass der abrupte Wegfall der Kaufprämie ab 2021 bis zum realen Break-Even-Point kontraproduktiv für die Absatzzahlen und somit auch für den Fortschritt von Elektrofahrzeugen sein kann.

Implikationen

Wie die Sensitivitätsanalyse gezeigt hat, ist eine hohe Laufzeit und -leistung notwendig, damit sich die Anschaffung eines BEV rentiert. Daher sollten sich gerade solche Fuhrparks mit der Nutzung von Elektrofahrzeugen beschäftigen. Im direkten Gegensatz dazu stellen die derzeitigen realen Reichweiten und lange Ladedauern eine Restriktion dar. So wird die Notwendigkeit einer Reichweitenanalyse verdeutlicht.

Ein weiterer wichtiger Aspekt stellt die Kaufprämie dar. Es wurde gezeigt, dass der Ablauf der Kaufprämie im Jahr 2021 zur Folge hat, dass Elektrofahrzeuge teurer in der Gesamtbetriebskostenbetrachtung ausfallen. Geht man von einem Standard-Nutzungsprofil von 36 Monaten Laufzeit und 15.000 km Laufleistung aus, so ergeben sich für die TCO beider Antriebsarten die Werte in Tabelle 54.

Tabelle 54: TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr mit $l = 36$ Monate und $s = 15.000\ km$

t	TCO_{I^t}	TCO_{E^t}	Delta
2017	15.515,44 €	18.308,15 €	2.792,71 €
2018	15.601,65 €	17.030,12 €	1.428,48 €
2019	15.738,27 €	15.976,97 €	238,70 €
2020	15.827,55 €	15.112,80 €	- 714,75 €
2021	15.918,10 €	18.251,42 €	2.333,32 €
2022	16.009,95 €	17.641,67 €	1.631,72 €
2023	16.103,11 €	17.144,70 €	1.041,59 €
2024	16.197,61 €	16.742,72 €	545,10 €
2025	16.293,49 €	16.420,81 €	127,31 €
2026	16.390,77 €	16.166,44 €	- 224,33 €
2027	16.489,48 €	15.969,11 €	- 520,36 €

Auch hier wird deutlich, dass durch den Ablauf der E-Prämie der Verbrenner ab 2021 bis 2025 günstiger sein wird. Dies verdeutlicht die Sinnhaftigkeit einer Kaufprämie bzw. einer staatlichen Subvention zum aktuellen Stand. Daher kann hier für die Politik eine Handlungsempfehlung bezüglich der Kaufprämie gegeben werden: Anstelle sie ab 2021 abzuschaffen, sollte die Prämie in gestaffelter Form so weiter existieren, dass mindestens der Break-Even-Point anhand des Standard-Nutzungsprofils erreicht wird. Die empfohlene Kaufprämie wird in Abbildung 109 dargestellt. Es ist anzumerken, dass die Zahlenwerte lediglich einen Richtwert angeben und eine potentielle Staffelung verdeutlichen sollen.

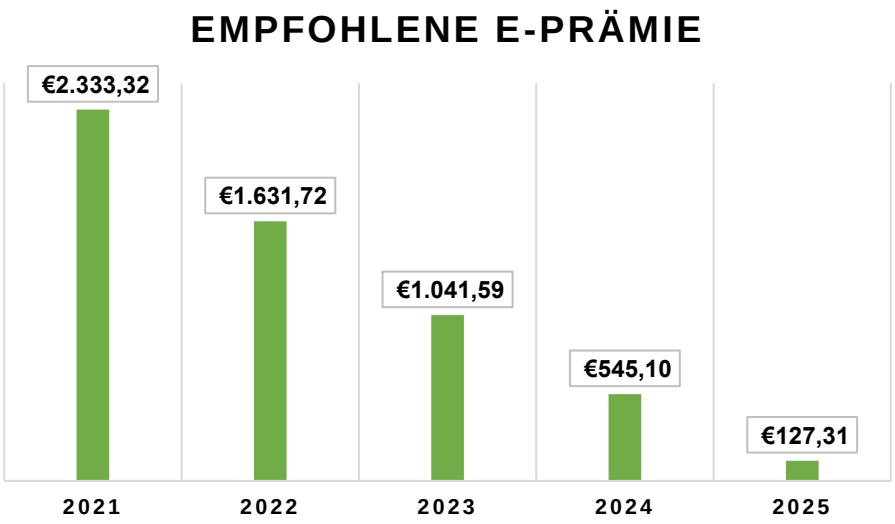


Abbildung 109: Empfohlene Kaufprämie für Elektrofahrzeuge 2021-2025

Anwendung des Tools im Rahmen eines Workshops für Flottenbetreiber und –dienstleister

Aus organisatorischen und zeitlichen Gründen musste auf die angedachte Anwendung des Tools im Rahmen eines Workshops für Flottenbetreiber und –dienstleister verzichtet werden. Insbesondere die noch fehlende Programmierung einer aktuellen Fahrzeugliste mit modellspezifischen Parametern zur Berechnung modellspezifischer TCO schränkt den Mehrwert des Tools für Praktiker ein. So können etwa die wichtigen Modellvergleiche zwischen verschiedenen Herstellerangeboten bei der Fahrzeugbeschaffung noch nicht angestellt werden.

Um die Erhebungseinheiten trotzdem angemessen an den Projektergebnissen partizipieren zu lassen, wurden die gesamten Forschungsergebnisse der Befragungen praxisgerecht aufbereitet und auf der Plattform GigaMove[62] zum Download zur Verfügung gestellt. Von dieser Möglichkeit machten die Erhebungseinheiten regen Gebrauch.

Tabelle 55 zeigt die Download-Statistik für die bereitgestellten Forschungsergebnisse aus den Fuhrparkleiter-, Dienstwagen- und Poolfahrzeugnutzern-Befragungen.

Tabelle 55: Download-Statistik der bereitgestellten Forschungsergebnisse (Stand: 30.09.2017)

Auswertungsdatei	Anzahl der Downloads
Fuhrparkleiter	182
Poolnutzer	233
Dienstwagennutzer	208

[62] Die Anwendung Gigamove wird von der RWTH Aachen für alle Mitglieder des DFN-Vereines bereitgestellt.

3.1.21 AP 4700 Modellbasierte Prognosen auf der Basis von Szenario-Analysen mit verschiedenen umwelttechnischen und fahrzeugspezifischen Rahmenbedingungen

Ziele des Arbeitspakets 4700

Die Ziele des Arbeitspakets waren die Einbeziehung von Zukunftsszenarien und -erwartungen in die Anwendung des zuvor konzeptionierten Entscheidungsmodells.

Erweiterungen des Basismodells und Einbeziehungen von Erwartungen

Das zuvor beschriebene Basismodell wird nun durch verschiedene Annahmen und Parameter erweitert. Zunächst soll die Prognose über die Entwicklung der Kraftstoff- und Strompreise auf eine andere Datenbasis gebracht werden. Es wird angenommen, dass die Kraftstoff- und Stromkosten nicht mehr anhand historischer Daten linear berechnet werden, sondern auf den Angaben über die Erwartungen der Strom- und Dieselpreisentwicklung der befragten Fuhrparkleiter- und Dienstwagennutzer-Stichproben beruhen. Im Folgenden wird die Prognose ab dem Jahr 2020 um die Zukunftserwartungen dieser beiden Gruppen korrigiert. Des Weiteren wird eine Korrektur des im Basismodell modellierten Preisverfalls der Batterien vorgenommen. Außerdem wird der Wertverlust des modellierten Fahrzeugmodells anhand empirischer Daten angepasst. Schließlich wird eine weitere Antriebstechnologie in das Basismodell implementiert. Dabei handelt es sich um den Plug In-Hybrid VW Golf GTE DSG. Entsprechend wird das Gleichungssystem des Basismodells um die Parameter des Plug In-Hybrid ergänzt.

Stromkosten - Erwartungen der Erhebungseinheiten

Die zukünftige Attraktivität von Elektromobilität hängt auch von der Entwicklung der Stromkosten ab. Die im TCO-Modell ursprünglich verwendeten Daten gehen auf historische Werte zurück, die in den Jahren von 2005 bis 2016 ermittelt wurden. Dabei werden sowohl die Werte für die Strompreise der Privathaushalte als auch die günstigeren Tarife für die Industrie (einschließlich Verbrauchssteuern und ohne MwSt.) betrachtet. Relevant für die folgende Aktualisierung der Daten ist die Preisentwicklung für die Industrie. Aus diesen Angaben wurde eine Prognose für die Jahre 2017 bis 2030 abgeleitet. Die neuen Werte für die Strompreisprognose ergeben sich aus Umfragewerten von den zuvor erwähnten zwei Stichproben, die zusammengeführt aus insgesamt 201 Auskunftspersonen bestehen. Bei 152 Auskunftspersonen handelt es sich um Fuhrparkleiter, 49 Auskunftspersonen kommen aus der Stichprobe der Dienstwagennutzer (User Chooser). Diese 49 Befragungsteilnehmer nehmen in den Erhebungseinheiten als Geschäftsführer oder Eigentümer auch bei der Anschaffung von Firmen-Pkw die Rolle eines Entscheiders ein.

Bei den folgenden Werten handelt es sich um den gewichteten Mittelwert aus den Angaben beider Stichproben für die Jahre 2020, 2025 und 2030. Die Werte dazwischen wurden durch eine lineare Interpolation ermittelt. Abbildung 110 stellt die Diskrepanz zwischen den Erwartungen der Auskunftspersonen und der historischen Prognose der Industriestrompreise dar.

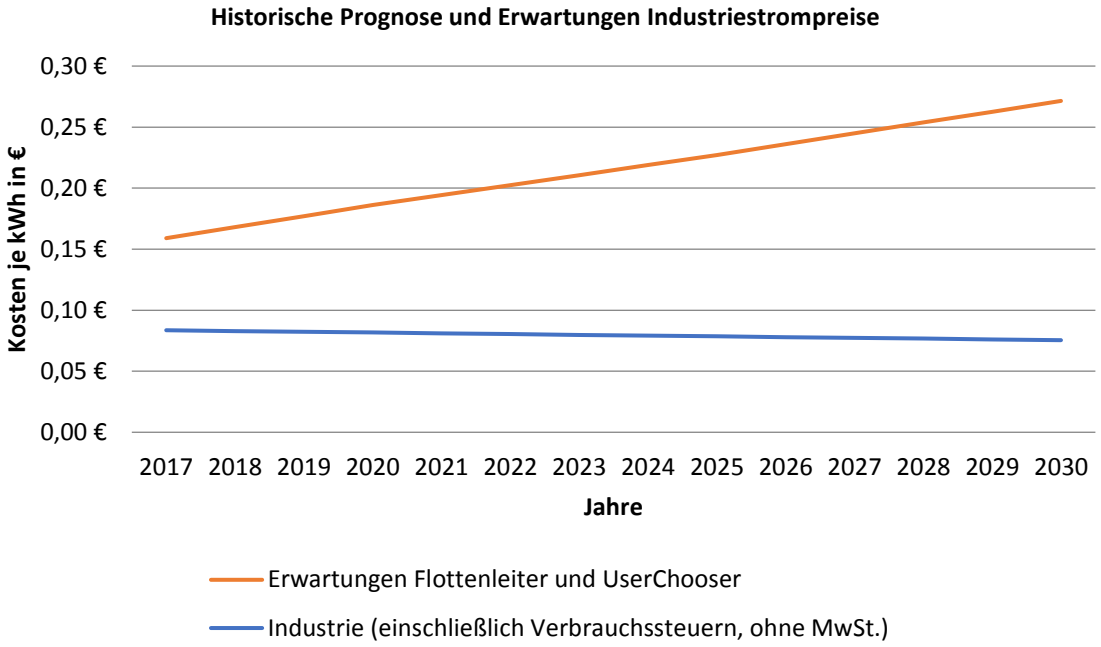


Abbildung 110: Von den Erhebungseinheiten erwartete und historisch prognostizierte Strompreise

Wie in Abbildung 111 zu erkennen ist, gehen Fuhrparkleiter und User Chooser von einem deutlichen Anstieg der Strompreise bis zum Jahr 2030 aus. Während die Prognose für die Jahre 2017 bis 2030 von einem stetigen Abwärtstrend ausgeht und zwischen 0,05 €/kWh und 0,10 €/kWh liegt, erwarten die Befragten einen starken Anstieg der Preise, von 0,10 €/kWh in 2017 bis auf 0,27 €/kWh in 2030. Betrachtet man die Ergebnisse der Befragungen für beide Gruppen im Vergleich, so fällt auf, dass die Erwartungen in Bezug auf die Stromkostenentwicklung nahezu identisch sind. Diese Entwicklung ist in Abbildung 111 dargestellt.

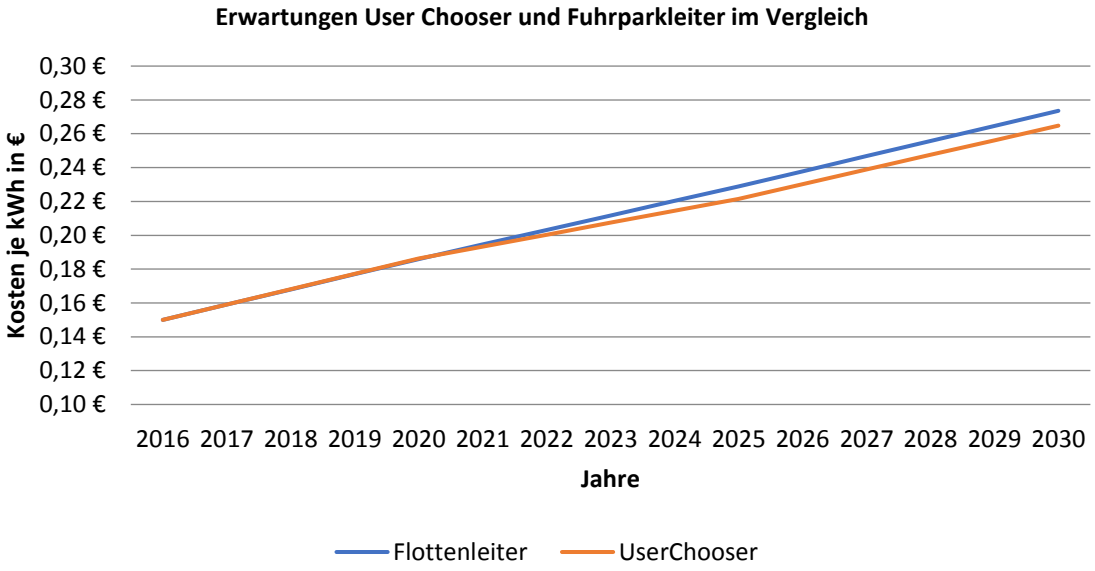


Abbildung 111: Erwartete Strompreise von Fuhrparkleitern ($n = 152$) und Dienstwagennutzern ($n = 49$) im Vergleich

Die Funktion der Fuhrparkleiter hat eine steilere Steigung als diejenige der User Chooser-Gruppe. Beide Gruppen sehen eine klar steigende Tendenz, die im Jahr 2030 bei Strompreisen von etwa 0,27 €/kWh (Fuhrparkleiter) und 0,26 €/kWh (User Chooser) resultiert.

Kraftstoffkosten – Erwartungen der Erhebungseinheiten

Die gleiche Anpassung wird nun für die Treibstoffkosten vorgenommen. In diesem Fall hat die Stichprobe von insgesamt 207 Auskunftspersonen, darunter 158 Fuhrparkleiter und 49 User Chooser, ihre Erwartungen für die Entwicklung der Dieselpreise in 2020, 2025 und 2030 im Rahmen der Zweitbefragungsrunde abgegeben. Die Werte dazwischen wurden wiederum durch eine lineare Interpolation ermittelt.

Auch in diesem Fall bleibt die Prognose, die sich zuvor (AP 4600) aufgrund der historischen Werte ergibt, deutlich unter den Erwartungen der Fuhrparkleiter und User Chooser. Während die Erwartungen zur Dieselpreis-Entwicklung bis 2020 noch unter den historisch prognostizierten Werten liegen, verläuft der Trend für die Erwartungen ab 2020 deutlich steiler. Während der Preis pro Liter Diesel in den Erwartungen der Befragten ab 2029 bereits 2 € und mehr beträgt, beläuft sich die historische Prognose auf Werte um etwa 1,50 € pro Liter. Bei den Werten zu den Zukunftserwartungen handelt es sich wieder um Mittelwerte aus den Angaben für beide Gruppen von Auskunftspersonen. Abbildung 112 zeigt den Verlauf der erwarteten und der historisch prognostizierten Dieselpreise noch einmal grafisch.

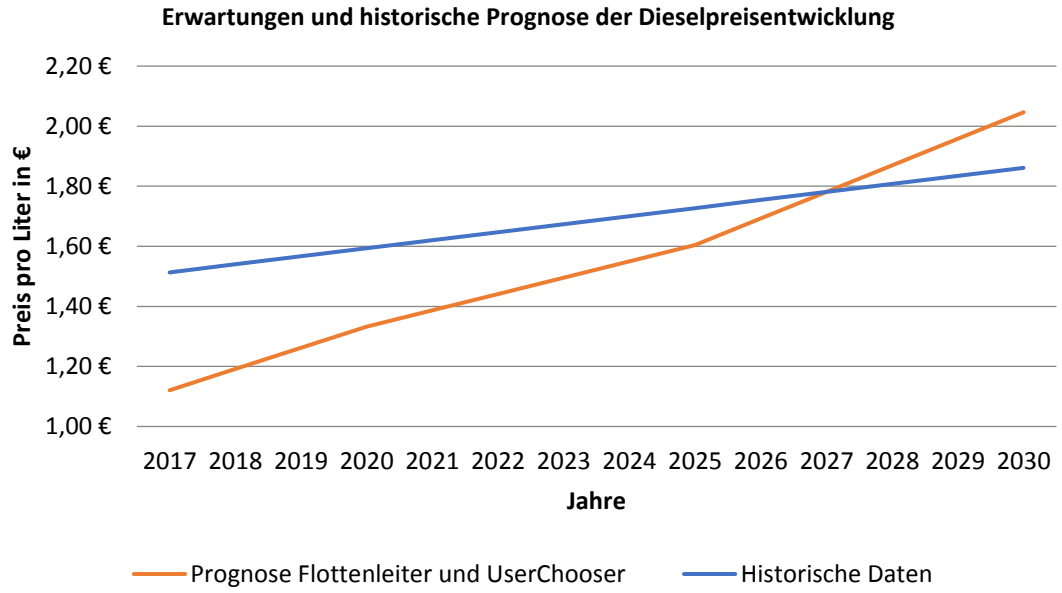


Abbildung 112: Von den Erhebungseinheiten erwartete und historisch prognostizierte Dieselpreise

Es lässt sich festhalten, dass die Auskunftspersonen sowohl bei den Strom- als auch bei den Dieselkosten deutlich stärkere Anstiege in der Zukunft erwarten.

Abbildung 113 zeigt die Erwartungen über die Entwicklung der Dieselpreise von Fuhrparkleitern und User Choosern einmal getrennt im Vergleich.

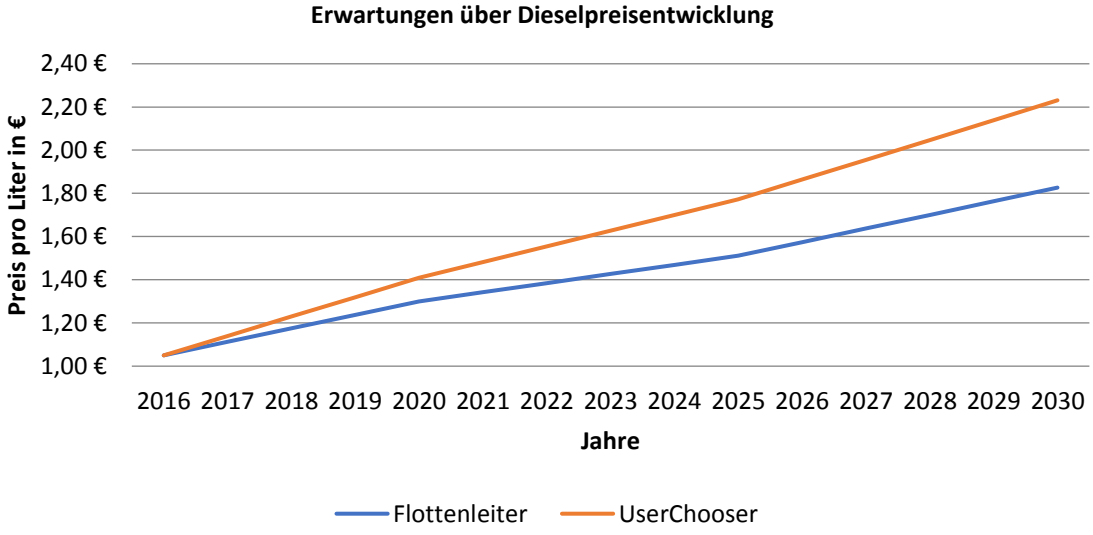


Abbildung 113: Erwartete Strompreise von Fuhrparkleitern ($n = 158$) und Dienstwagennutzern ($n = 49$) im Vergleich

Während sich beide Auskunftsgruppen in Bezug auf die Tendenz der künftigen Strompreise einig sind, ergibt sich bei der Schätzung der Dieselpreise ein erheblicher Unterschied.

Wie man in Abbildung 113 sehen kann, erwartet die Gruppe der User Chooser einen Anstieg der Dieselpreise bis auf 2,3 €/l im Jahr 2030. Die Gruppe der Fuhrparkleiter hingegen hält einen moderaten Anstieg für realistischer, sodass der Preis pro Liter auf etwa 1,8 € im Jahr 2030 geschätzt wird. Insgesamt schätzen die User Chooser die Preissteigerungen in Bezug auf Strom- und Treibstoffkosten tendenziell höher ein als die Fuhrparkleiter. Der Unterschied fällt bei den Erwartungen zur Dieselpreisentwicklung deutlich höher aus.

Gesamtbetriebskosten – Erwartungen der Erhebungseinheiten

Bei den hier betrachteten Modellen handelt es sich um den VW e-Golf und den VW Golf 1.6 TDI BMT Trendline. Im Jahr 2016 betrugen die Kilometerkosten dieser beiden Modelle in der ADAC Kostenübersicht 56,7 Cent/Kilometer für den VW e-Golf und 46,2 Cent/Kilometer für den VW Golf 1.6 TDI BMT Trendline. Einer aktuellen ADAC-Studie zufolge betragen diese im Jahr 2017, 47,4 Cent/Kilometer für den VW e-Golf und 42,6 Cent/Kilometer für den VW Golf 1.6 TDI BMT Trendline. In der Studie wird von einer Nutzungsdauer von fünf Jahren und einer durchschnittlichen Fahrleistung von 15.000 km/Jahr, also 75.000 km für die gesamte Nutzungszeit, ausgegangen.[63]

Die Kilometerkosten für den e-Golf sind somit um 9,3 Cent/Kilometer gesunken, während sich die Kosten für den VW Golf 1.6 TDI ebenfalls um 3,6 Cent/Kilometer verringert haben.

Die Stichprobe von Fuhrparkleitern wurde hinsichtlich ihrer Erwartungen zur Kilometerkostenentwicklung für die oben genannten Modelle für die Jahre 2020, 2025 und 2030 befragt. Dabei sollten sie von einer Haltedauer von vier Jahren und einer jährlichen Kilometerleistung von 15.000 km/Jahr ausgehen.

Die Mittelwerte ihrer Erwartungen sind in Abbildung 114 zusammengefasst.

[63] Vgl. ADAC Autokosten (2017)

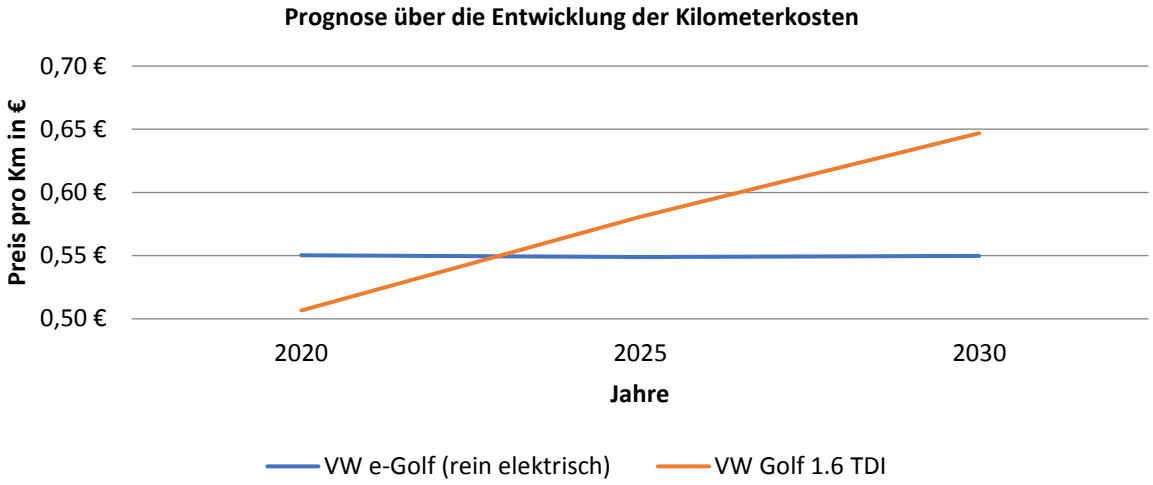


Abbildung 114: Erwartete Entwicklung der Kilometerkosten ($n = 121$)

Aus den Angaben der befragten Fuhrparkleiter lässt sich ableiten, dass ein deutlicher Kilometerkostenanstieg für das Verbrenner-Modell in der Periode von 2020 bis 2030 erwartet wird, während die erwarteten Kosten für das reinelektrische Modell sogar einen leichten Abwärtstrend zeigen.

Restwerte und Batterie – Anpassungen des Basismodells

Schließlich soll der Wertverlust der Verbrenner- und Elektrofahrzeuge noch einmal modelliert werden. Während man bei Verbrennerfahrzeugen auf eine lange Historie von Erfahrungswerten zurückgreifen kann, muss man sich aufgrund der jungen Technologie bei Elektrofahrzeugen auf unsichere Prognosen stützen.

Das Basismodell geht bei der Modellierung des Wertverlusts von einer zweistufigen Funktion aus (AP 4600).[64] Es wurde außerdem modelliert, dass keine Abweichungen zwischen Verbrenner- und Elektrofahrzeugen bestehen, sodass die Werte des Verbrenner-Modells auch für die Elektro-Version Verwendung fanden. Dieser Ansatz soll nun nochmals kritisch geprüft werden. Zur kritischen Prüfung wurden Restwerte aus dem ADAC Autokostenrechner herangezogen. Dieser stützt sich auf Marktbeobachtungen der DAT Group.[65] Es wird eine Laufzeit von 4 Jahren mit einer jährlichen Laufleistung von 10.000 km angenommen. Untersucht wurden die Restwert- und Wertverlustentwicklungen von 20 Elektroauto- und 23 Hybrid-Modellen. Diese werden anschließend mit den Ergebnissen aus einer Auswertung der Daten von 30 Verbrennerfahrzeugen verglichen.

[64] Vgl. Hölzle (2014), S. 68

[65] Vgl. ADAC Autokosten (2017).

Abbildung 115 zeigt die durchschnittliche prozentuale Wertverlustentwicklung aufgeschlüsselt nach den beiden Fahrzeugvarianten reinelektrische Fahrzeuge (BEV) und Plug In-Hybride (PHEV).

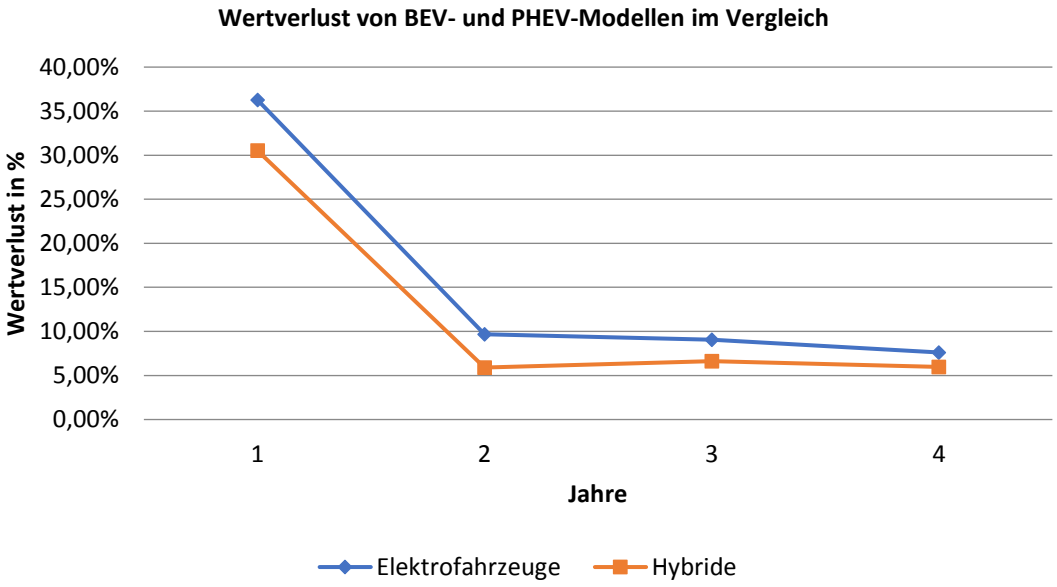


Abbildung 115: Wertverlust von BEV- und PHEV-Modellen im Vergleich

Aus Abbildung 115 wird ersichtlich, dass sowohl die BEV- als auch PHEV-Modelle tatsächlich über eine zweistufige Wertverlustfunktion modelliert werden können. Der Wertverlust im ersten Jahr beträgt bei BEV-Modellen durchschnittliche 36,28% und bei PHEV-Modellen etwa 30,53%. In den Folgejahren zwischen 7% und 9% bei BEV-Modellen und zwischen 5% und 7% bei Plug In-Hybriden. Trotz abweichender Prozentsätze entspricht die zweistufige Funktion auch der Annahme des Basismodells von Hölzle für Verbrenner-Modelle.

Vergleicht man den durchschnittlichen Wertverfall der Verbrennerfahrzeuge mit dem der Elektro- und Plug In-Hybrid-Modelle wird deutlich, dass die Werte für Elektrofahrzeuge etwas höher liegen. Abbildung 116 zeigt den Wertverlust der drei Antriebsarten im Vergleich.

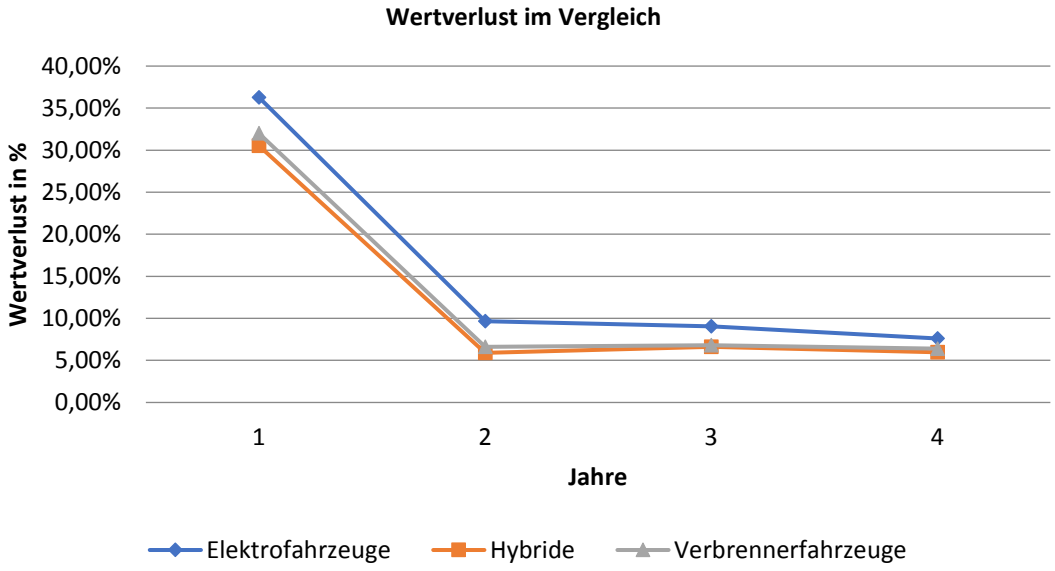


Abbildung 116: Wertverlust von Verbrenner-, BEV- und PHEV-Modellen im Vergleich

Im ersten Jahr ist der Wertverlust der Elektrofahrzeuge um 4,3% höher, als der der Verbrennerfahrzeuge und 5,8% höher im Vergleich zu Plug-In-Hybriden. In den Folgejahren nimmt die Differenz ab. So liegt der prozentuale Wertverfall der Elektrofahrzeuge nach zwei Jahren 3,1%, nach drei Jahren 2,3% und nach vier Jahren 1,2% über den Werten der Verbrennerfahrzeuge. Im Vergleich zu den Plug In-Hybriden ist der Wertverfall der reinelektrischen Modelle (BEV) im zweiten Jahr um 3,8%, im dritten Jahr um 2,4% und im vierten Jahr um 1,6% höher. Vergleicht man Plug In-Hybrid- und Verbrenner-Modelle fällt auf, dass der Verlauf der Wertverlustfunktion bei Verbrenner- und Hybridfahrzeugen nahezu identisch ist.

Aus dieser Betrachtung lässt sich ableiten, dass eine Modellierung des Wertverlusts für Verbrenner- und Elektromodelle nicht einheitlich gestaltet werden sollte, da Elektrofahrzeuge besonders in den ersten beiden Jahren stärker an Wert verlieren. Aus diesem Grund muss das Basismodell korrigiert werden.

Tabelle 56 zeigt die Unterschiede, die sich im Vergleich zum Basismodell für den prozentualen Wertverlust bei einer konstanten Laufleistung von 10.000 km und vier Jahren Nutzungsdauer ergeben.

Tabelle 56: Vergleich Wertverlust Basismodell und Datenerhebung

Nutzungsjahr	Basismodell	Datenerhebung Verbrenner	Datenerhebung BEV	Datenerhebung PHEV
1. Jahr	29,9 %	32 %	36,28 %	30,53 %
2. Jahr	4,9 %	6,6 %	9,66 %	5,9 %
3. Jahr	4,9 %	6,8 %	9,05 %	6,61 %
4. Jahr	4,9 %	6,4 %	7,61 %	5,98 %

Aus dem Vergleich der Restwerte von 50 verschiedenen Fahrzeugmodellen geht hervor, dass der Wertverlust der BEV-Modelle als relativ höher angenommen werden muss. Auch die übrigen Werte sollten nach oben korrigiert werden.

Neben dem prozentualen Anteil, um den sich der Fahrzeugwert jährlich verringert, sinkt dieser auch je gefahrenen Kilometer um einen bestimmten Prozentsatz. Das Grundmodell (AP 4600) hatte hierfür einen Wertverfall von 0,7 % je 5.000 km angenommen. Dieser nutzungsbezogene Wertverlust wird anhand der DAT-Report-gestützten Datenanalyse korrigiert. Für BEV-, PHEV- und Verbrenner-Modelle ergeben sich nach der Bildung des Durchschnitts über verschiedene Fahrzeugmodelle die Werte der Tabelle 57.

Tabelle 57: Durchschnittlicher prozentualer Wertverlust je 5.000 km Laufleistung

Fahrzeugtyp	Wertverlust je 5.000 km Laufleistung
BEV	3,84 %
PHEV	3,38 %
Verbrenner	2,88 %

Ein großer Kostentreiber bei Elektro- und Hybridfahrzeugen ist der Batteriepreis. Das Grundmodell (AP 4600) greift bei der Modellierung der Batteriepreise auf Daten der Meta-Studie von Nykvist zurück. Weitere Kostensenkungen unterhalb von 80 €/kWh erweisen sich nach Expertenmeinung als schwierig, da die Rohstoffkosten bereits in diesem Bereich liegen.[66]

Die vom Fraunhofer Institut entwickelte Roadmap für Elektromobilität kommt zu dem Ergebnis, dass Kostensenkungen vor allem durch Materialinnovationen und Skaleneffekte erreicht werden. Der drastische Kostenverfall der Batteriepreise in den letzten Jahren wird durch eine geringe Nachfrage und daraus hervorgehenden Produktionsüberkapazitäten begründet. So haben asiatische Hersteller Zellen unterhalb der Produktionskosten verkauft.[67]

Aus heutiger Sicht ist nicht davon auszugehen, dass der Kostenverfall dauerhaft anhalten wird. Es erscheint unrealistisch, dass sich die Batteriepreise ohne einen technologischen Durchbruch langfristig auf null zubewegen werden, wie beim Grundmodell (AP 4600) modelliert. Sofern also keine erhebliche Technologieveränderung eintritt, werden die Preise auf lange Sicht auf einem bestimmten Niveau stagnieren. Um eine bessere Annäherung an die prognostizierten Werte aus der Forschung zu erreichen wird eine Stagnation des Preises bei 163,51 $/kWh angenommen. Der Kostenverlauf nach der Anpassung ist in Abbildung 117 dargestellt.

[66] Vgl. Söllner (2017)

[67] Vgl. Thielmann et al. (2015), S. 8.

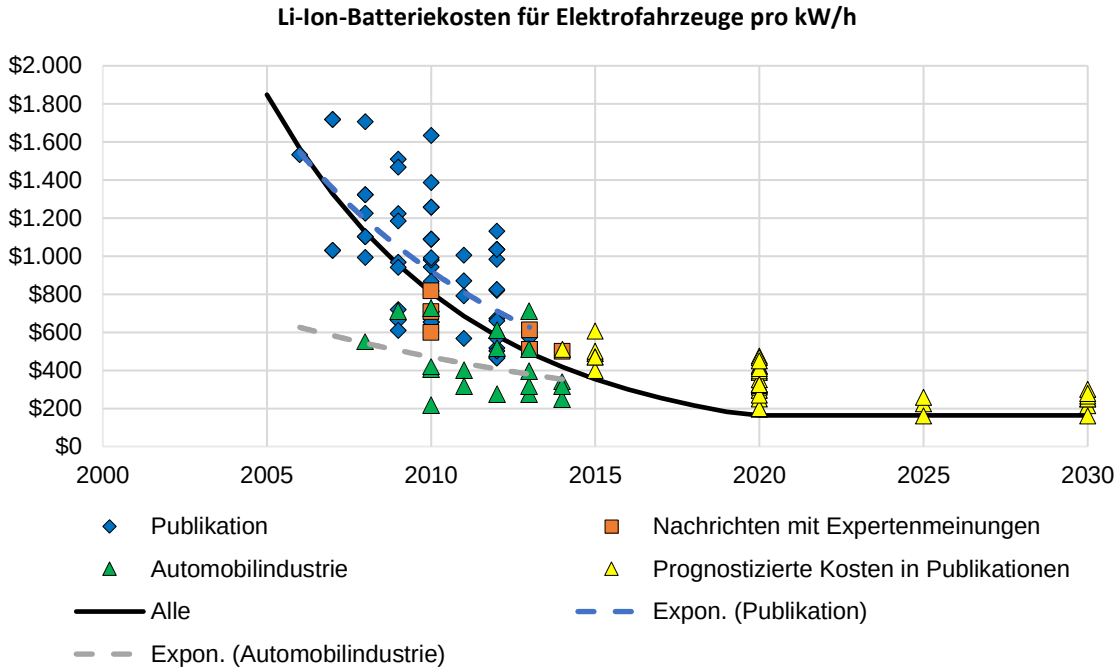


Abbildung 117: Angepasster Li-Ion Batteriekostenverlauf

Implementierung Plug In-Hybrid

Schließlich soll das Basismodell um ein Plug In-Hybridmodell ergänzt werden. Als Fahrzeugtyp wird hierfür der VW Golf GTE DSG mit folgenden Daten verwendet, sodass der Conversion-Ansatz des Basismodells weiterhin verfolgt wird:

PHEV: VW Golf GTE DSG

(ab 03/17)

• Leistung: 150 kW

• Batteriekapazität: 8,7 kWh

• Verbrauch: 11,4 kWh / 100 km und 1,6 l/100km

• Bruttolistenpreis: 36.900 €

• Nettolistenpreis 31.008 €

Modellierung des Plug In-Hybrid-Modells

Um die Kosten des Plug-In-Hybrides modellieren zu können, müssen die entsprechenden Gleichungen in das Modell implementiert werden. Alle Parameter, die Kostenvariablen in Bezug auf den Plug In-Hybrid darstellen, werden mit einem PH als Index versehen. Analog zum Grundmodell lautet die neue Zielfunktion:

$$G^0(k_D, B) = \sum_{t=0}^{T} n^t \min[\, TCO_{I^t},\, TCO_{E^t}, TCO_{PH^t}] + TCO_{IRest} + TCO_{ERest} + TCO_{PHRest} \quad (3\text{-}27)$$

Da die Restkosten wie bereits erläutert durch die bereits in der Flotte befindlichen Fahrzeuge verursacht werden und keinen Einfluss auf zukünftige Perioden haben, können sie vernachlässigt werden, weshalb sich eine reduzierte Zielfunktion ergibt:

$$G^0(k_D, B) = \sum_{t=0}^{T} n^t \min[\, TCO_{I^t},\, TCO_{E^t}, TCO_{PH^t}] \quad (3\text{-}28)$$

Der Unterschied zur Zielfunktion des Basismodells ergibt sich daraus, dass zusätzlich die Kosten des Plug In-Hybrides TCO_{PH^t} mit in den TCO-Vergleich einbezogen werden. Analog zu der Kostengleichung für das reinelektrische Modell können die TCO_{PH^t} wie folgt beschrieben werden:

$$TCO_{PH^t} = p^t \left(a_{PH}^t + B^t - p_{PH}^t - r_{PH}^{t+\frac{l}{12}-1} \right) + \sum_{\tau=t}^{t+\frac{l}{12}-1} p^\tau (kv_{PH}^\tau + k_{fPH}^\tau) \quad (3\text{-}29)$$

a_{PH}^t bezeichnet dabei die Anschaffungskosten des Plug In-Hybrid zum Zeitpunkt t. Bei B^t handelt es sich um die Batteriekosten. Die Prämie p_{PH}^t wird wie bei Elektrofahrzeugen bis 2019 ausbezahlt. $r_{PH}^{t+\frac{l}{12}-1}$ bezeichnet den Restwert nach Ablauf der Nutzung $t + \frac{l}{12} - 1$, t steht dabei für den aktuellen Zeitpunkt und l für die Laufzeit in Monaten.

Die variablen Kosten eines Plug In-Hybrid setzen sich zusammen aus dem Verbrauch des Fahrzeuges in Litern pro km v_{PH_k}, dem Benzinpreis pro Liter k_B und der Jahresfahrleistung s, sowie dem Energieverbrauch in kWh pro km v_{PH} multipliziert mit dem Strompreis e pro kWh und der Fahrleistung s. Somit ergibt sich folgende Formel:

$$k_{v_{PH}} = \begin{cases} (v_{PH_k} \cdot k_B \cdot s) + (v_{PH} \cdot e \cdot s) & wenn\ s \leq 100\ km \\ (v_{PH_k} \cdot k_B \cdot s) & wenn\ s > 100\ km \end{cases} \quad (3\text{-}30)$$

Im ersten Fall werden die variablen Kosten bis 100 km Fahrtstrecke betrachtet. Auf dieser Strecke laufen Verbrenner- und Elektromotor parallel, weshalb sowohl Kraftstoff als auch Strom verbraucht wird. Ab 100 km Fahrtstrecke ist die Reichweite des Elektromotors ausgeschöpft, weshalb nur noch Verbrauchskoten für Kraftstoff anfallen.

Der Kraftstoffverbrauch ist somit ab 100 km höher, da dann nur noch der Verbrennungsmotor das Fahrzeug antreibt. Um den durchschnittlichen Verbrauch ausrechnen zu können, muss ermittelt werden zu welchen Anteilen Strecken bis und über 100 km Fahrtstrecke gefahren werden. Dann kann die gewichtete Summe der beiden zuvor gezeigten Formeln gebildet werden. Das Vorgehen zeigt folgende Gleichung:

$$k_{v_{PH}} = \boldsymbol{g_1}((v_{PH_k} \cdot k_B \cdot s) + (v_{PH} \cdot e \cdot s)) + \boldsymbol{g_2}(v_{PH_k} \cdot k_B \cdot s) \quad (3\text{-}31)$$

Die beiden Gewichte g_1 und g_2 drücken aus zu welchen Anteilen welche Strecke gefahren wird.

Die Fixkosten setzen sich zusammen aus der Kfz-Steuer $k_{f_{PH_S}}$, den Versicherungskosten $k_{f_{PH_V}}$ und der HU/AU $k_{f_{PH_U}}$ (abzüglich der technologiebedingten Abgasuntersuchung) und ergeben somit:

$$k_{f_{PH}} = k_{f_{PH_S}} + k_{f_{PH_V}} + k_{f_{PH_U}} \quad (3\text{-}32)$$

Im den folgenden Abschnitt wird die Quantifizierung der einzelnen Parameter hergeleitet.

Anschaffungskosten und Prämie Plug In-Hybriden

Im Basismodell wird davon ausgegangen, dass die Anschaffungspreise aufgrund von Inflation und anderen Faktoren jährlich um 2,329 % steigen. Die Angaben wurden aus historischen Werten ermittelt. Die Annahme wird in diesem Arbeitspaket übernommen. Ebenso wird die Batterie separat betrachtet.

Ein wichtiger Parameter, der bei den Anschaffungskosten ins Gewicht fällt ist die staatliche Prämie, die beim Kauf eines Elektroautos oder Plug In-Hybrid ausgezahlt wird. Diese beträgt für reine Elektrofahrzeuge 4.000 € und für Hybridfahrzeuge 3.000 €. Nach Angaben der Bundesregierung wird die Prämie solange vergeben, bis die Mittel von 1,2 Mrd. Euro aufgebraucht sind oder das Jahr 2019 endet.[68] Aus diesem Grund wird die staatliche Unterstützung bei der Kostenmodellierung des BEV- und des PHEV-Modells wieder nur bis 2019 im Modell berücksichtigt.

Fixkosten Plug In-Hybrid

Eine weitere Abgabe, die Fahrzeughalter entrichten müssen, ist die Kraftfahrzeugsteuer (Kfz-Steuer). Diese richtet sich nach dem Tag der Erstzulassung, der Motorgröße sowie der Menge der Schadstoffemissionen. Die Bundesregierung hat im Rahmen des Förderprogrammes für Elektrofahrzeuge eine Befreiung dieser von der Kfz-Steuer für 10 Jahre beschlossen.[69] Die Befreiung von der Kfz-Steuer gilt ausschließlich für reine Elektrofahrzeuge, weshalb die Kfz-Steuer bei Hybridautos berücksichtigt werden muss.

Aus diesem Grund muss diese auch in den Fixkostenblock einkalkuliert werden. Zwar wird das Hybridfahrzeug bei der Kfz-Steuer genauso wie ein normales Verbrennerfahrzeug behandelt, dennoch ergeben sich durch den niedrigeren CO_2-Ausstoß (laut Berechnung) Vergünstigungen im Vergleich zu Verbrenner-Modellen. Die Kfz-Steuer für den VW Golf GTE DSG ergibt sich auf Basis von Tabelle 58.

[68] Vgl. Die Bundesregierung (2016b)

[69] Vgl. Die Bundesregierung (2016c)

Tabelle 58: Fahrzeugdaten für die Berechnung der Kfz-Steuer

Fahrzeugart	PKW Erstzulassung ab 01.01.2014
Antriebsart	Benzin
Hubraum	1395 ccm
CO_2-Wert	36 g/km

Basierend auf diesen Daten beträgt die jährliche Kfz-Steuer für den VW Golf GTE DSG 28 €. Es wird zudem davon ausgegangen, dass die Steuer bis 2030 konstant bleibt.

Ein weiterer Fixkostenblock sind die Versicherungskosten. In der folgenden Darstellung der Versicherungskosten für den VW Golf GTE DSG ist die Haftpflicht- und Vollkaskoversicherung mit 50% in den Fixkosten enthalten. Die Angaben basieren auf den Daten der ADAC Autodatenbank.[70] Tabelle 59 zeigt die Versicherungskosten der drei Fahrzeugtypen im Vergleich:

Tabelle 59: Versicherungskosten im Vergleich

	VW Golf GTE DSG	**VW Golf 1.6 TDI BMT Trendline**	**VW e-Golf**
Typklasse	17/19/21	16/18/21	17/20/21
Haftpflicht R6, 100%	829 €	784 €	829 €
Vollkasko R4, 100% 500.- € SB	953 €	854 €	1030 €
Teilkasko R7, 150.- € SB	180 €	180 €	180 €

Lässt man die Haftpflichtversicherung sowie die Vollkaskoversicherung zu je 50% in die Betrachtung einfließen so ergeben sich für das Hybridmodell Kosten von 891 €, für den Verbrenner 819 € und für das Elektroauto 929,5 € pro Jahr. Da der Plug In-Hybrid in den Anschaffungskosten teurer als das Elektroauto ist, bietet sich ebenso wie beim Elektrofahrzeug eine Vollkaskoversicherung an.

Laut der Straßenverkehrsordnung (§ 29 StVZO) sieht der Gesetzgeber eine verpflichtende Hauptuntersuchung, die Untersuchung des Motormanagements und des Abgasreinigungssystems vor. Die erste Untersuchung (UMA) ist für Neuwagen nach 36 Monaten fällig und wird danach im Abstand von 24 Monaten durchgeführt.[71]

[70] Vgl. ADAC (2017b)

[71] Vgl. TÜV Rheinland (2017)

Die Kosten für eine Hauptuntersuchung (HU) inkl. Teiluntersuchung (UMA) mit Gasmessung betragen für den Pkw 101,00 €. Dabei wird der Hybrid aufgrund seines Verbrennungsmotors voll belangt.

Betriebskosten Plug In-Hybrid

Zu den variablen Kosten zählen im Fall des Plug In-Hybrid die Strom- sowie Kraftstoffkosten, da dieser seine Energie aus beiden Quellen bezieht. Zudem müssen auch die Werkstattkosten berücksichtigt werden. Wichtig für die Bestimmung der Betriebskosten ist sowohl die Kenntnis der Energiemarktpreise als auch über die Energieverbräuche der betrachteten Fahrzeuge.

In die folgenden Berechnungen gehen die aus den Befragungen ermittelten erwarteten Stromkosten der befragten Fuhrparkleiter und User Chooser ein. Tabelle 60 zeigt die hierfür verwendeten Parameter:

Tabelle 60: Erwartete Industriestrompreise bis 2030

Stromkosten in €/kWh	
Jahr	**€/kWh**
2016	0,150
2017	0,159
2018	0,168
2019	0,177
2020	0,186
2021	0,194
2022	0,202
2023	0,211
2024	0,219
2025	0,227
2026	0,236
2027	0,245
2028	0,254
2029	0,263
2030	0,271

Da es sich bei dem VW Golf GTE DSG um einen Benzin-Hybrid handelt, müssen die Kraftstoffpreise im Vergleich korrigiert werden. Die Analyse der historischen Daten für die Treibstoffpreisentwicklung für Diesel und Benzin von 1972 bis 2016 ergab, dass die Preise für Benzin inklusive Mehrwertsteuer um durchschnittlich 0,136 €/l höher liegen, als für Diesel (AP 4600). Somit müssen die Prognosewerte, die sich für die Dieselpreisentwicklung ergeben haben, um diesen Faktor nach oben korrigiert werden. Es ergeben sich die in Tabelle 61 präsentierten Erwartungswerte für die künftige Diesel- und Benzinpreisentwicklung:

Tabelle 61: Entwicklung der Diesel- und Benzinpreise bis 2030

Jahr	Diesel (inkl. MwSt.)	Diesel (ohne MwSt.)	Benzin (inkl. MwSt.)	Benzin (ohne MwSt.)
2016	1,050	0,851	1,193	0,966
2017	1,119	0,906	1,271	1,030
2018	1,188	0,962	1,350	1,093
2019	1,257	1,018	1,428	1,157
2020	1,326	1,074	1,506	1,220
2021	1,382	1,119	1,570	1,272
2022	1,438	1,165	1,633	1,323
2023	1,494	1,210	1,697	1,374
2024	1,549	1,255	1,760	1,426
2025	1,605	1,300	1,823	1,477
2026	1,694	1,372	1,924	1,559
2027	1,783	1,444	2,025	1,641
2028	1,872	1,516	2,126	1,722
2029	1,961	1,588	2,227	1,804
2030	2,050	1,660	2,328	1,886

Die Werte für die Benzinpreise ergeben sich aus einem 13,6 prozentigen Preisaufschlag auf den prognostizierten Dieselpreis der jeweiligen Periode.

Wie zuvor gezeigt wurde, hängt der Verbrauch des VW Golf GTE DSG maßgeblich von der tatsächlich zurückgelegten Streckenlänge ab. Die Herstellerangaben gehen von einem Treibstoffverbrauch von 1,6 l/100km und einem Stromverbrauch von 11,4 kWh/100km aus. Eine Messung des ADAC ergibt allerdings andere Werte. Demzufolge verbraucht das Fahrzeug auf einer Strecke von 100 km 3,3 l Benzin und 7,0 kWh Strom. Ist die Batterie vollends leer steigt der Verbrauch auf 5,1 l/100km an. Die rein elektrische Mindestreichweite wird mit 50 km berechnet, wobei auch hier bei einer weniger sparsamen Fahrweise mit tendenziell geringeren Werten zu rechnen ist.[72]

Abbildung 118 zeigt ein Ergebnis der Fuhrparkleiter-Befragungen, das im Folgenden zur Berechnung der Gesamtbetriebskosten in das entwickelte Tool eingeht:

[72] Vgl. ADAC (2015)

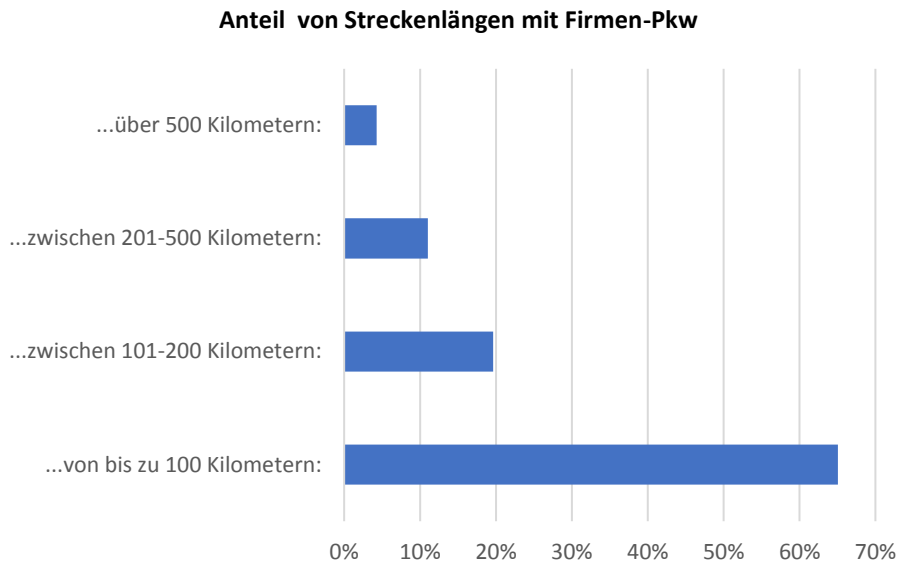


Abbildung 118: Anteile von Streckenlängen mit Firmen-Pkw (n=242)

Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, beträgt der Anteil von Fahrten mit Streckenlängen bis zu 100 km nach Angaben der befragten 242 Fuhrparkleiter in den Erhebungseinheiten im Durchschnitt 65,7%. 34,3% der Fahrten mit Firmen-Pkw sind dagegen länger als 100 km.

Um den Verbrauch des Plug In-Hybrid möglichst realistisch darstellen zu können, werden die ermittelten Gewichte und Verbräuche in Formel für den Kraftstoffverbrauch eingesetzt. Für die beiden Gewichte g_1 und g_2 ergeben sich die Werte 0,657 und 0,343. Der so ermittelte kombinierte Verbrauch beträgt 3,92 l/100 km im Durchschnitt. Der Stromverbrauch liegt bei 7,0 kWh/100km auf den ersten 100 km Fahrtstrecke, da auf dieser Strecke der Elektromotor und der Verbrennungsmotor jeweils 50 betrieben werden. Ferner wird davon ausgegangen, dass die Batterie nach 100 km mit Verbrenner- und Elektromotor leer ist. Bei längeren Fahrtstrecken steigt der Kraftstoffverbrauch weiter an, während der Stromverbrauch stagniert, da der Elektromotor nicht weiterbetrieben werden kann. Daher wird der Stromverbrauch ebenfalls mit den zuvor erfragten Streckenlängen-Gewichtungen multipliziert, wobei zu 65,7 % ein Verbrauch von 7,0 kWh/100 km entsteht und in 34,3 % kein Strom verbraucht wird.

Neben den Treibstoff- und Energiekosten fließen auch die Werkstattkosten in die Betriebskosten ein. Darin enthalten sind die Kosten für Inspektionen und Wartungen, Reparaturkosten und Reifenersatz. Der ADAC Autodatenbank zufolge ergeben sich hierbei für den VW Golf GTE DSG monatliche Kosten von 57,14 € Netto. Auf das Jahr gerechnet ergeben sich Kosten von 686 € Netto.[73]

[73] Vgl. ADAC (2017b)

Wertverlust Plug-In-Hybrid

Wie bereits zuvor ausgeführt sind die Wertverluste von Plug In-Hybrid- und Verbrenner-Modell vergleichbar. Um Werte für das Untersuchungsobjekt, den VW Golf GTE DSG, breiter abstützen zu können, wurden die Wertverluste von einer Gruppe vergleichbarer Plug In-Hybridmodellen untersucht. Die Modellparameter ergeben sich aus dem durchschnittlichen Wertverlust der Gruppe betrachteter Modelle bei einer Laufleistung von 10.000 km jährlich: Für das erste Jahr beträgt der Wertverlust des Plug In-Hybrid 32,6%, für das zweite Jahr 5,5%, im dritten Jahr sinkt der Wert nochmal um 6,3% und im vierten Jahr um 5,5%. Diese Werte liegen etwas oberhalb des im Basismodell angenommenen Wertverlustes für Verbrenner-Modelle.

Da das Modell mit mehreren Szenarien arbeitet, müssen auch die Veränderungen, die sich bei einer steigenden Laufleistung ergeben in Betracht gezogen werden. Insgesamt werden jährliche Laufleistungen von 10.000 km, 15.000 km, 20.000 km, 25.000 km und 30.000 km im Modellrahmen betrachtet. Analysiert man den durchschnittlichen Wertverlust der betrachteten Plug In-Hybrid-Modelle je 5.000 km, so ergibt sich hierfür ein zusätzlicher Wertverfall von 3,4%.

(Flottenspezifische) Szenario-Analysen mit verschiedenen umwelt- und fahrzeugspezifischen Rahmenbedingungen

Die Entwicklung der Diesel- und Strompreise stützt sich in diesem Vorhaben auf die Erwartungen der beiden Befragungsgruppen Fuhrparkleiter und User Chooser. Die befragte Stichprobe soll nun in drei Gruppen von Beschaffungstypen aufgeteilt werden, sodass flottenspezifische Ergebnisse aus der TCO-Berechnung abgeleitet werden können.

Im Rahmen der Befragungen wurden drei grundlegende Beschaffungstypen von Firmen-Pkw unterschieden, zu denen die Auskunftspersonen sich bzw. stellvertretend die eigene Erhebungseinheit zuordnen mussten:

- Konservativ
- Kostenbewusst
- Grüner Innovator

Der konservative Beschaffungstyp wählt die Fahrzeuge nach Marken und Image aus und legt Wert auf die repräsentative Wirkung. Die kostenbewusste Gruppe richtet sich in ihrer Entscheidung nach der kostenoptimalen Lösung, während die grünen Innovatoren ihren Fokus auf die Nachhaltigkeit des Produktes legen und dadurch womöglich eher gewillt sind Einbußen in anderen Bereichen, wie etwa Komfort und Kosten der Firmen-Pkw, in Kauf zu nehmen.

Abbildung 119 zeigt die Verteilung der Befragten auf die verschiedenen Beschaffungstypen:

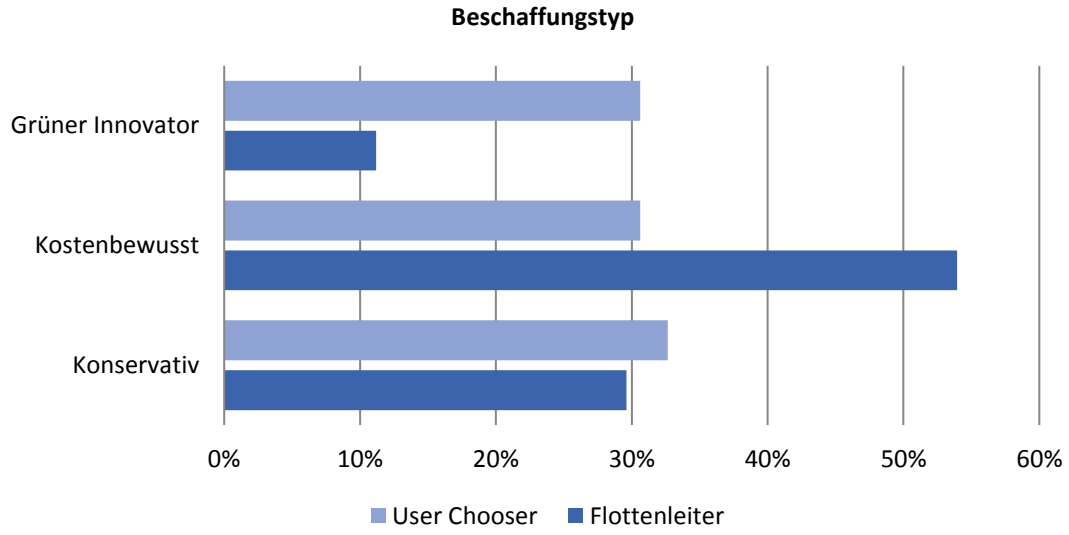


Abbildung 119: Verteilung der Beschaffungstypen der Dienstwagenfahrer (n=63) und Fuhrparkleiter (n=226)

Die Gruppe der Fuhrparkleiter trifft ihre Entscheidung mehrheitlich (54%) nach dem kostenbewussten Prinzip. Am schwächsten ausgeprägt ist dort der Beschaffungstyp der grünen Innovatoren (11%). Bei den befragten User Choosern mit Entscheidungskompetenz ist die Verteilung auf die verschiedenen Beschaffungsgruppen dagegen gleich. Die Gruppe der grünen Innovatoren und kostenbewussten Entscheider ist hier mit jeweils 31% gleich stark vertreten. 33% der befragten User Chooser beschaffen Firmen-Pkw konservativ, also marken- und imagebewusst.

Flottenspezifische Ergebnisse aus den TCO-Berechnungen werden nun anhand der gebildeten Gruppen von Beschaffungstypen bzw. deren Erwartungen an verschiedene Modellvariablen abgeleitet. Die folgenden beiden Abbildungen (vgl. Abbildung 120 und Abbildung 121) zeigen die Erwartungen zur Diesel- und Strompreisentwicklung für die verschiedenen Beschaffungstypen und gruppenunspezifisch, also für die gesamte Stichprobe:

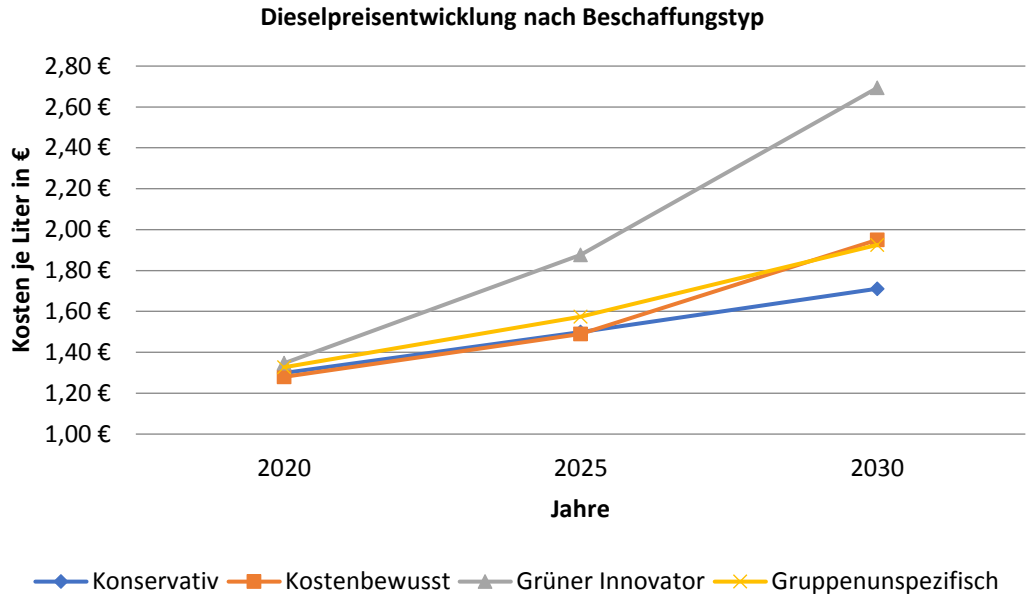


Abbildung 120: Erwartete Dieselpreisentwicklung nach Beschaffungstyp und gruppenunspezifisch

Im Vergleich zum Gruppendurchschnitt schätzen die konservativ (marken- und imagebewusst) eingestellten Fuhrparkleiter und User Chooser den Preisanstieg am geringsten ein. Die Gruppe der grünen Innovatoren liegt deutlich über dem Durchschnitt, während die Firmen-Pkw kostenbewusst beschaffende Gruppe einen in etwa durchschnittlichen Anstieg erwartet.

Beim Anstieg der Strompreise zeigen sich die Kostenbewussten am pessimistischsten. Die grünen Innovatoren liegen mit ihren Erwartungen genau im Gruppendurchschnitt. Die Gruppe rund um den konservativen Beschaffungstyp liegt unter dem gruppenunspezifischen Durchschnitt, wie Abbildung 121 zeigt:

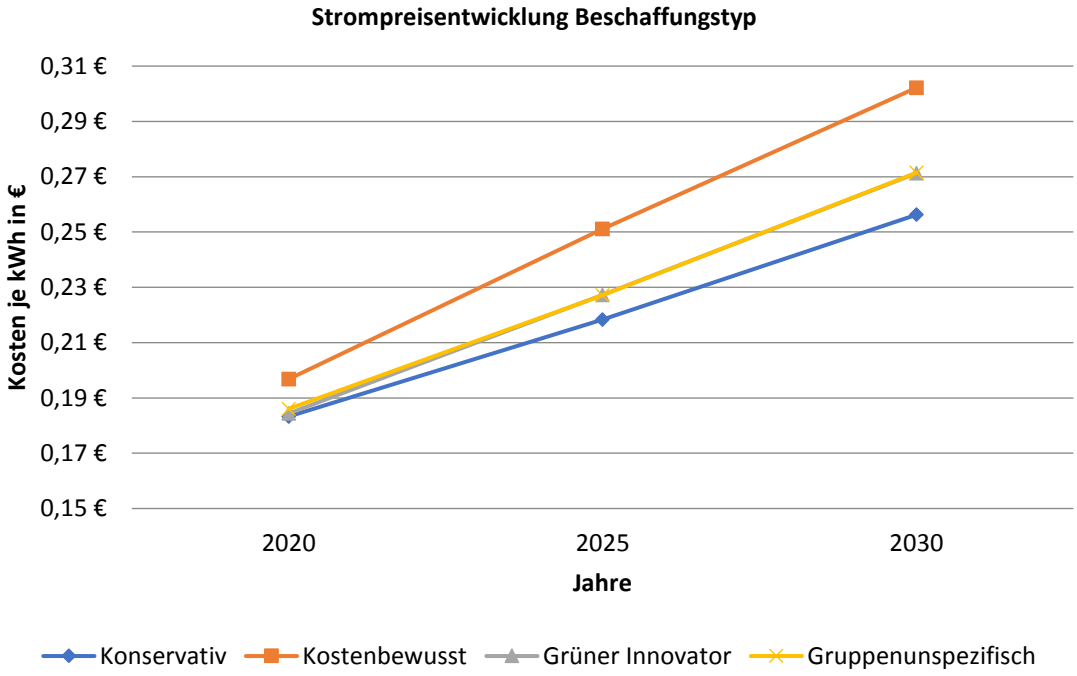


Abbildung 121: Erwartete Strompreisentwicklung nach Beschaffungstyp und gruppenunspezifisch

Betrachtet man die beiden Auskunftsgruppen Fuhrparkleiter und User Chooser getrennt voneinander, so ist vor allem die große Diskrepanz bei den Erwartungen der grünen Innovatoren anzumerken. Bei den User Choosern erwarten die grünen Innovatoren im Vergleich mit den korrespondierenden Fuhrparkleitern einen deutlich steileren Anstieg der Dieselpreise. Bei den Strompreisen ist dies nicht der Fall.

Es wird deutlich, dass die Erwartungen an künftige Diesel- und Strompreisentwicklungen gruppenspezifisch unterschiedlich sind. Die Gruppenunterschiede werden in den folgenden Kapiteln für die Szenario-Analysen bei der TCO-Berechnung verwendet. Um die Vergleichbarkeit der Szenarien mit dem Basismodell (AP 4600) gewährleisten zu können, wird an dieser Stelle wieder mit folgenden Parametervoreinstellungen gearbeitet:

- $n = 1$
- $l = 36$
- $s = 15.000\ km$

Für den Batteriepreis wird das Standardszenario voreingestellt.

Standardszenario

Das Standardszenario besteht aus den jeweils gruppenunspezifischen Werten, die für die Strom- und Treibstoffpreise ermittelt wurden. Für die TCO nach Anschaffungsjahr ergeben sich folgende Werte (vgl. Tabelle 62):

Tabelle 62: TCO je Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr, Standardszenario

Jahr	TCO (ICV)	TCO (BEV)	TCO (PHEV)	Delta (BEV-ICV)	Delta (ICV-PHEV)	Delta (BEV-PHEV)
2017	20.822,80 €	24.920,21 €	21.333,65 €	4.097,41 €	- 510,85 €	3.586,56 €
2018	21.085,34 €	24.174,42 €	21.462,06 €	3.089,08 €	- 376,71 €	2.712,36 €
2019	21.361,18 €	23.593,79 €	21.609,95 €	2.232,61 €	- 248,78 €	1.983,83 €
2020	21.602,40 €	27.252,69 €	24.721,73 €	5.650,29 €	- 3.119,33 €	2.530,96 €
2021	21.833,24 €	27.457,34 €	24.963,69 €	5.624,10 €	- 3.130,45 €	2.493,65 €
2022	22.065,11 €	27.664,72 €	25.207,35 €	5.599,61 €	- 3.142,24 €	2.457,37 €
2023	22.298,09 €	27.874,89 €	25.452,78 €	5.576,80 €	- 3.154,69 €	2.422,11 €
2024	22.554,38 €	28.089,53 €	25.717,39 €	5.535,15 €	- 3.163,01 €	2.372,15 €
2025	22.833,60 €	28.308,65 €	26.000,89 €	5.475,05 €	- 3.167,29 €	2.307,77 €
2026	23.135,38 €	28.532,28 €	26.303,01 €	5.396,90 €	- 3.167,63 €	2.229,27 €
2027	23.437,19 €	28.758,81 €	26.606,12 €	5.321,61 €	- 3.168,93 €	2.152,69 €

Die Tabellenspalten TCO (ICV), TCO (BEV) und TCO (PHEV) geben die Total Cost of Ownership an, die sich je Fahrzeugtyp im jeweiligen Jahr ergeben. Die drei rechten Spalten zeigen, inwieweit eine Ersparnis durch die Beschaffung des Fahrzeugtyps anstelle eines anderen möglich ist. So ist der ICV gegenüber allen anderen Antrieben am kostengünstigsten. Vergleicht man BEV und PHEV miteinander ist der PHEV durchgehend kostengünstiger.

Tabelle 63 gibt einen Überblick über die Ergebnisse, die sich bei der Anschaffung einer Antriebsart über den gesamten Zeithorizont ergeben:

Tabelle 63: Kumulierte TCO eines Antriebs über den gesamten Zeithorizont, Standardszenario

Jahr	TCO (ICV)	TCO (BEV)	TCO (PHEV)	Delta (ICV-BEV)	Delta (ICV-PHEV)	Delta (BEV-PHEV)
2017	20.822,80 €	24.920,21 €	21.333,65 €	4.097,41 €	- 510,85 €	3.586,56 €
2018	41.908,14 €	49.094,63 €	42.795,70 €	7.186,49 €	- 887,57 €	6.298,93 €
2019	63.269,32 €	72.688,42 €	64.405,66 €	9.419,10 €	- 1.136,34 €	8.282,76 €
2020	84.871,72 €	99.941,11 €	89.127,39 €	15.069,39 €	- 4.255,67 €	10.813,72 €
2021	106.704,95 €	127.398,45 €	114.091,08 €	20.693,49 €	- 7.386,12 €	13.307,37 €
2022	128.770,07 €	155.063,16 €	139.298,43 €	26.293,10 €	- 10.528,36 €	15.764,74 €
2023	151.068,16 €	182.938,06 €	164.751,21 €	31.869,90 €	- 13.683,05 €	18.186,85 €
2024	173.622,53 €	211.027,59 €	190.468,59 €	37.405,06 €	- 16.846,06 €	20.559,00 €
2025	196.456,13 €	239.336,24 €	216.469,48 €	42.880,11 €	- 20.013,35 €	22.866,76 €
2026	219.591,51 €	267.868,52 €	242.772,49 €	48.277,01 €	- 23.180,98 €	25.096,03 €
2027	243.028,71 €	296.627,33 €	269.378,61 €	53.598,62 €	- 26.349,90 €	27.248,72 €

Daraus folgt, dass die Anschaffung des ICV über den gesamten Planungshorizont am kostengünstigsten ist. In Tabelle 64 ist die optimale Beschaffungspolitik dargestellt:

Tabelle 64: Optimale Beschaffungspolitik im Standardszenario

Jahr	optimale TCO pro Periode	optimale Antriebsart pro Periode
2017	20.822,80 €	ICV
2018	21.085,34 €	ICV
2019	21.361,18 €	ICV
2020	21.602,40 €	ICV
2021	21.833,24 €	ICV
2022	22.065,11 €	ICV
2023	22.298,09 €	ICV
2024	22.554,38 €	ICV
2025	22.833,60 €	ICV
2026	23.135,38 €	ICV
2027	23.437,19 €	ICV

Hierbei stellt der ICV in allen Jahren die kostengünstigste Antriebsart dar (kumulierte Gesamtbetriebskosten: 243.028,71 €). Dieses Ergebnis weicht von den Berechnungen des Basismodells ab. Dort wird der ICV zwar auch als die Antriebsart ermittelt, die am häufigsten kostenoptimal ist, jedoch lohnt sich in den Jahren 2019, 2020, 2025, 2026 und 2027 die Anschaffung eines BEV.

Szenario grüner Innovator

Zu dem Szenario der grünen Innovatoren zählen alle Fuhrparkleiter und User Chooser, die sich selbst dieser Gruppe zugeordnet haben. Tabelle 65 zeigt die TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr, die sich aus diesem Szenario ergeben:

Tabelle 65: TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr, Szenario grüner Innovator

Jahr	TCO (ICV)	TCO (BEV)	TCO (PHEV)	Delta (BEV-ICV)	Delta (ICV-PHEV)	Delta (BEV-PHEV)
2017	20.681,67 €	24.913,44 €	21.223,99 €	4.231,77 €	- 542,32 €	3.689,45 €
2018	20.952,88 €	24.164,36 €	21.358,19 €	3.211,48 €	- 405,32 €	2.806,16 €
2019	21.248,36 €	23.582,50 €	21.520,81 €	2.334,15 €	- 272,45 €	2.061,70 €
2020	21.541,36 €	27.242,23 €	24.672,39 €	5.700,87 €	- 3.131,04 €	2.569,83 €
2021	21.855,46 €	27.449,68 €	24.978,75 €	5.594,22 €	- 3.123,29 €	2.470,93 €
2022	22.190,33 €	27.659,82 €	25.301,89 €	5.469,49 €	- 3.111,56 €	2.357,94 €
2023	22.524,25 €	27.872,70 €	25.625,21 €	5.348,45 €	- 3.100,96 €	2.247,49 €
2024	22.857,32 €	28.088,99 €	25.948,96 €	5.231,67 €	- 3.091,64 €	2.140,03 €
2025	23.226,50 €	28.308,74 €	26.301,43 €	5.082,24 €	- 3.074,93 €	2.007,31 €
2026	23.631,14 €	28.531,97 €	26.682,13 €	4.900,83 €	- 3.050,99 €	1.849,84 €
2027	24.070,62 €	28.758,11 €	27.090,44 €	4.687,50 €	- 3.019,82 €	1.667,68 €

Auch in diesem Szenario ist der ICV die kostengünstigste Variante. Die Anschaffung eines BEV im Vergleich zu der Anschaffung eines PHEV lohnt sich in keinem Jahr. Über den gesamten Beschaffungshorizont ergibt sich ein ähnliches Bild, wie Tabelle 66 demonstriert:

Tabelle 66: TCO bei der Beschaffung einer Antriebsart über den gesamten Zeithorizont, Szenario grüner Innovator

Jahr	TCO (ICV)	TCO (BEV)	TCO (PHEV)	Delta (ICV-BEV)	Delta (ICV-PHEV)	Delta (BEV-PHEV)
2017	20.681,67 €	24.913,44 €	21.223,99 €	4.231,77 €	- 542,32 €	3.689,45 €
2018	41.634,55 €	49.077,80 €	42.582,19 €	7.443,25 €	- 947,64 €	6.495,61 €
2019	62.882,91 €	72.660,30 €	64.103,00 €	9.777,40 €	- 1.220,09 €	8.557,31 €
2020	84.424,26 €	99.902,53 €	88.775,39 €	15.478,27 €	- 4.351,13 €	11.127,14 €
2021	106.279,73 €	127.352,21 €	113.754,14 €	21.072,49 €	- 7.474,42 €	13.598,07 €
2022	128.470,05 €	155.012,04 €	139.056,03 €	26.541,98 €	- 10.585,98 €	15.956,00 €
2023	150.994,31 €	182.884,74 €	164.681,24 €	31.890,43 €	- 13.686,94 €	18.203,49 €
2024	173.851,63 €	210.973,73 €	190.630,21 €	37.122,10 €	- 16.778,58 €	20.343,52 €
2025	197.078,13 €	239.282,47 €	216.931,64 €	42.204,34 €	- 19.853,51 €	22.350,83 €
2026	220.709,27 €	267.814,44 €	243.613,77 €	47.105,17 €	- 22.904,50 €	24.200,67 €
2027	244.779,89 €	296.572,55 €	270.704,21 €	51.792,66 €	- 25.924,32 €	25.868,34 €

Betrachtet man die Kosten über den gesamten Zeithorizont, so ist der ICV in der Anschaffung kostenoptimal. Der PHEV rentiert sich nach wie vor mehr als der BEV, der gegenüber allen andere Antriebstypen am schlechtesten abschneidet. Die ermittelte Beschaffungspolitik sieht folglich die Anschaffung des ICV über alle Perioden hinweg als optimal an. Diese Lösung ist für die Jahre 2017 bis 2027 mit kumulierten Gesamtbetriebskosten von 244.779,89 € optimal für das Szenario grüner Innovator.

Szenario Kostenbewusst

Alle Fuhrparkleiter- und User Chooser, die in der Befragung angegeben haben Beschaffungsentscheidungen kostenbewusst zu treffen, werden diesem Szenario zugeordnet. Tabelle 67 zeigt den Kostenvergleich für das jeweilige Anschaffungsjahr:

Tabelle 67: TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr, Szenario kostenbewusst

Jahr	TCO (ICV)	TCO (BEV)	TCO (PHEV)	Delta (BEV-ICV)	Delta (ICV-PHEV)	Delta (BEV-PHEV)
2017	20.767,69 €	24.963,67 €	21.302,48 €	4.195,98 €	- 534,79 €	3.661,19 €
2018	21.003,41 €	24.239,03 €	21.415,72 €	3.235,62 €	- 412,31 €	2.823,31 €
2019	21.253,58 €	23.678,98 €	21.549,19 €	2.425,40 €	- 295,61 €	2.129,79 €
2020	21.470,29 €	27.357,90 €	24.647,27 €	5.887,61 €	- 3.176,98 €	2.710,63 €
2021	21.677,73 €	27.582,00 €	24.876,25 €	5.904,27 €	- 3.198,52 €	2.705,75 €
2022	21.886,69 €	27.808,45 €	25.107,20 €	5.921,76 €	- 3.220,52 €	2.701,24 €
2023	22.097,21 €	28.037,29 €	25.340,18 €	5.940,08 €	- 3.242,97 €	2.697,11 €
2024	22.341,70 €	28.267,05 €	25.599,58 €	5.925,35 €	- 3.257,88 €	2.667,47 €
2025	22.619,55 €	28.497,81 €	25.884,98 €	5.878,26 €	- 3.265,43 €	2.612,83 €
2026	22.930,20 €	28.729,66 €	26.195,96 €	5.799,46 €	- 3.265,76 €	2.533,70 €
2027	23.240,73 €	28.964,23 €	26.507,77 €	5.723,50 €	- 3.267,04 €	2.456,46 €

Betrachtet man die Kosten im jeweiligen Anschaffungsjahr lohnt sich auch hier durchgängig die Anschaffung eines ICV. Soll die Entscheidung zwischen dem BEV und PHEV getroffen werden, so rentiert sich ausschließlich der PHEV.

Über den gesamten Planungszeitraum ergibt sich das gleiche Bild. Die Kosten für den ICV und den PHEV liegen in allen Perioden unter denen des BEV. Eine kostenoptimale Lösung bringt die Anschaffung des ICV in jeder Periode. Die optimale Beschaffungspolitik für die Periode 2017 bis 2027, die sich aus diesem Szenario ergibt, ist die durchgängige Anschaffung des ICV mit Gesamtbetriebskosten von 241.288,78 €.

Szenario konservativ

Die folgenden Ergebnisse basieren auf den Parametern der konservativ eingestellten Beschaffungsgruppe. Tabelle 68 zeigt wiederum die TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr:

Tabelle 68: TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr, Szenario konservativ

Jahr	TCO (ICV)	TCO (BEV)	TCO (PHEV)	Delta (BEV-ICV)	Delta (ICV-PHEV)	Delta (BEV-PHEV)
2017	20.787,54 €	24.909,01 €	21.303,85 €	4.121,47 €	- 516,31 €	3.605,16 €
2018	21.032,92 €	24.157,77 €	21.417,75 €	3.124,85 €	- 384,83 €	2.740,01 €
2019	21.288,03 €	23.570,47 €	21.548,11 €	2.282,44 €	- 260,08 €	2.022,36 €
2020	21.505,03 €	27.221,51 €	24.639,37 €	5.716,48 €	- 3.134,34 €	2.582,14 €
2021	21.708,22 €	27.417,12 €	24.857,90 €	5.708,91 €	- 3.149,68 €	2.559,22 €
2022	21.913,00 €	27.615,66 €	25.078,61 €	5.702,65 €	- 3.165,60 €	2.537,05 €
2023	22.119,44 €	27.817,16 €	25.301,54 €	5.697,72 €	- 3.182,10 €	2.515,62 €
2024	22.329,06 €	28.023,08 €	25.528,25 €	5.694,01 €	- 3.199,19 €	2.494,83 €
2025	22.541,88 €	28.233,42 €	25.758,75 €	5.691,53 €	- 3.216,86 €	2.474,67 €
2026	22.757,93 €	28.448,22 €	25.993,06 €	5.690,28 €	- 3.235,13 €	2.455,15 €
2027	22.975,75 €	28.666,09 €	26.229,74 €	5.690,35 €	- 3.253,99 €	2.436,36 €

Die durchgängige Anschaffung des ICV über den betrachteten Planungshorizont ist auch hier die optimale Lösung. Die Kosten des PHEV liegen über den gesamten Planungszeitraum unter denen des BEV. Der PHEV ist wiederum kosteneffizienter als der BEV. Die optimale Lösung für den Zeitraum 2017 bis 2027 enthält Kosten von 240.958,80 €.

Unterschiede der Szenarien

Im Folgenden werden die zuvor präsentierten vier TCO-Szenarien mit Standard-Batteriepreiseinstellung miteinander verglichen. Dargestellt sind in Tabelle 69 die Gesamtbetriebskosten, die sich für die Anschaffung jeweils einer Antriebsart über den gesamten Planungshorizont ergeben:

Tabelle 69: TCO nach Beschaffungstypen mit Standard-Batteriepreiseinstellung

	Batteriepreisszenario	Standard
Standard-szenario	TCO ICV	243.028,71 €
	TCO BEV	296.627,33 €
	TCO PHEV	269.378,61 €
Grüner Innovator	TCO ICV	244.779,89 €
	TCO BEV	295.862,63 €
	TCO PHEV	270.704,21 €
Konservativ	TCO ICV	240.958,80 €
	TCO BEV	296.079,50 €
	TCO PHEV	267.656,92 €
Kosten-bewusst	TCO ICV	241.288,78 €
	TCO BEV	298.126,08 €
	TCO PHEV	268.426,58 €

Wie Tabelle 69 zeigt haben die verschiedenen Szenarien einen Einfluss auf die kumulierten TCO. Für den ICV stellt das Szenario „grüner Innovator“ mit TCO von 244.779,89 € die ungünstigste Konstellation dar. Am niedrigsten fallen die Kosten für den ICV mit 240.958,80 € beim „konservativen“ Szenario aus.

Der BEV schneidet bei der Gruppe „grüner Innovator“ mit TCO von 295.862,63 € im Vergleich zu den anderen Szenarien am besten ab. Am höchsten liegen die erwarteten TCO des BEV in der „kostenbewussten“ Beschaffungsgruppe mit 298.126,08 €. Das ist darauf zurückzuführen, dass diese Gruppe den größten Anstieg der Strompreise erwartet. Für den PHEV sind die Erwartungen der „konservativen“ Gruppe mit 267.656,92 € am günstigsten. Am höchsten sind die erwarteten TCO des PHEV bei den „grünen Innovatoren“ mit 270.704,21 €.

Batteriepreisvariation

Einer der größten Unsicherheitsfaktoren ist die zukünftige Entwicklung der Batteriepreise, da technologische Innovationen auf diesem Gebiet schwierig vorhersehbar sind. Um mögliche Ungenauigkeiten in Bezug auf die Preisentwicklungen auffangen zu können, werden – wie im Basismodell – zusätzlich zum Standardszenario zwei weitere Szenarien angenommen, die jeweils eine 10%-Abweichung der Batteriepreise nach oben und nach unten darstellen. Auf diese Weise lassen sich die unterschiedlichen Batteriepreisentwicklungen mit den verschiedenen Szenarien kombinieren.

Tabelle 70 zeigt die kumulierten Gesamtbetriebskosten der möglichen Kombinationen:

Tabelle 70: Kumulierte Gesamtbetriebskosten nach Beschaffungstypen und Batteriepreisszenarien

	Batteriepreisszenario	Standard	Optimistisch	Pessimistisch
Standard-szenario	TCO ICV	243.028,71 €	243.028,71 €	243.028,71 €
	TCO BEV	296.627,33 €	292.918,69 €	300.706,83 €
	TCO PHEV	269.378,61 €	268.753,05 €	270.066,72 €
Grüner Innovator	TCO ICV	244.779,89 €	244.779,89 €	244.779,89 €
	TCO BEV	295.862,63 €	292.153,99 €	299.942,13 €
	TCO PHEV	270.704,21 €	270.078,65 €	271.392,32 €
Konservativ	TCO ICV	240.958,80 €	240.958,80 €	240.958,80 €
	TCO BEV	296.079,50 €	292.370,87 €	300.159,00 €
	TCO PHEV	267.656,92 €	267.031,37 €	268.345,04 €
Kosten-bewusst	TCO ICV	241.288,78 €	241.288,78 €	241.288,78 €
	TCO BEV	298.126,08 €	294.417,45 €	302.205,58 €
	TCO PHEV	268.426,58 €	267.801,02 €	269.114,69 €

Man erkennt den Einfluss, den die verschiedenen Batteriepreisszenarien „Standard“, „Optimistisch“ und „Pessimistisch“ auf die TCO haben: Niedrigere Batteriekosten wirken sich auf die TCO von BEV und PHEV aus, während die TCO des ICV hiervon unberührt bleiben. Das Ausmaß der Kostenreduktion ist jedoch so geringfügig, dass der ICV nach wie vor die kostenoptimale Variante darstellt und die optimale Beschaffungsstrategie selbst beim optimistischen Batteriepreisszenario unverändert bleibt. Auch die jeweiligen Szenarien haben weiterhin keinen Einfluss auf die gesamtbetriebskostenoptimale Beschaffungspolitik.

Ergebnisinterpretation aus den Szenario-Analysen

Das Ergebnis der Szenario-Auswertung für eine Laufzeit von 36 Monaten und eine Laufleistung von 15.000 km pro Jahr ergibt, dass die alleinige Anschaffung von Verbrenner-Modellen bis 2030 für alle gegebenen Szenarien die kostenoptimale Beschaffungsstrategie darstellt. Das Ergebnis weicht von den Ergebnissen des Grundmodells (AP 4600) ab. Die vorgenommenen Variationen der Modellparameter unter Zuhilfenahme der Befragungsergebnisse wirken sich demnach negativ auf die relative Kostenposition von Elektrofahrzeugen aus. Die Anpassung der Parameter für die Kraftstoff- und Stromkosten an die Erwartungen der befragten Auskunftspersonen führt – anders als im Basismodell – zu einem Anstieg der erwarteten Strompreise und zu einem moderateren Anstieg der Kraftstoffpreise. Das hat zur Folge, dass besonders der BEV als rein elektrische Antriebsart deutlich teurer wird, als vom Grundmodell (AP 4600) anhand von historischen Daten und Plausibilitätsannahmen berechnet. Der moderatere Treibstoffkostenverlauf senkt zudem die Kosten für den ICV.

Eine weitere Anpassung gegenüber dem Grundmodell ist die Veränderung der Wertverlustentwicklung. Es wird nicht mehr von einem einheitlichen Wertverlust für alle Antriebsarten ausgegangen, sondern nach ICV, BEV und PHEV differenziert. Die Analyse in diesem Arbeitspaket hat ergeben, dass der BEV im Vergleich zu den anderen Antriebsmodellen prozentual am meisten an Wert verliert. Auch das verursacht eine relative Mehrbelastung. In einem letzten Schritt wurde auch die Batteriepreisentwicklung angepasst.

So stagniert der Preis für Batterien ab dem Jahr 2020 und läuft nicht, wie von Grundmodell angenommen, asymptotisch gegen null. Eine solche Entwicklung hat zur Folge, dass die gesamten Anschaffungskosten (Chassis inkl. Batterie) nicht in dem Ausmaß sinken, wie im Grundmodell modelliert, was das TCO-Niveau des BEV relativ gegenüber ICE und PHEV weiter erhöht.

Betrachtet man die Ergebnisse für die einzelnen Jahre genauer, so fallen einige Besonderheiten im berechneten TCO-Kurvenverlauf auf. Abbildung 122 zeigt anhand des Standardszenarios und der Standardeinstellung für den Batteriepreis einen exemplarischen Kurvenverlauf für die 3 betrachteten Antriebstechnologien:

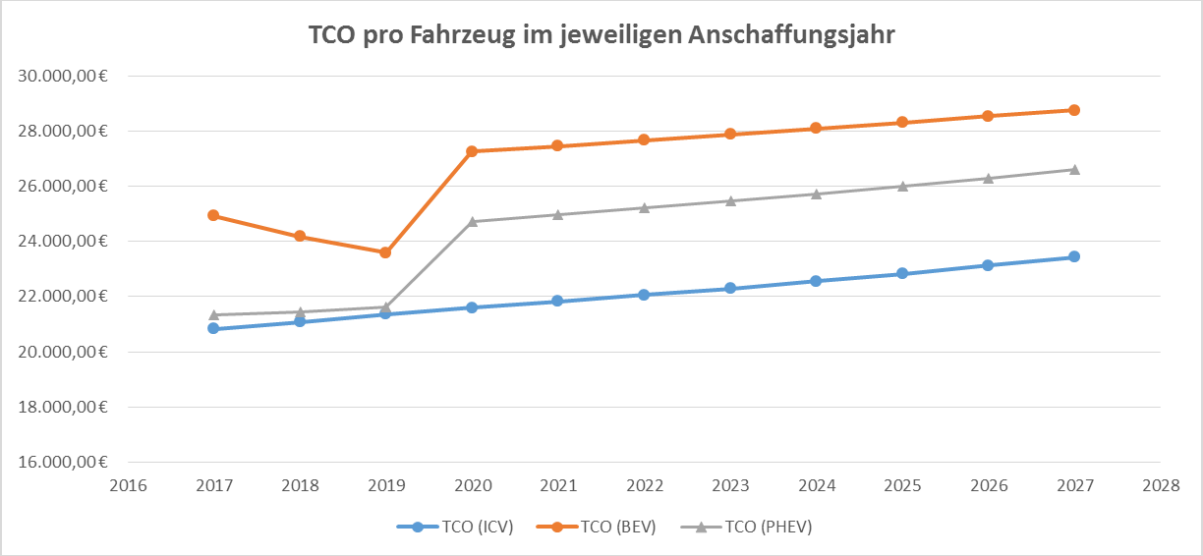


Abbildung 122: TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr, Standardszenario

Aus Abbildung 122 geht hervor, dass es bei den beiden Antriebsarten BEV und PHEV jeweils einen Zeitpunkt gibt, an dem die Kosten sprunghaft ansteigen. Dieser Punkt ist beim PHEV und beim BEV im Jahr 2019 erreicht. Der sprunghafte Anstieg der TCO ist auf den Wegfall der Prämie für Elektrofahrzeuge zurückzuführen: Die Förderung von 3.000 € für den PHEV und die von 4.000 € für den BEV läuft im Jahr 2019 aus. Es ist jedoch anzumerken, dass trotz der staatlichen Subventionen die TCO von BEV und PHEV zunächst höher bleiben, als diejenigen des ICV. Die Analyse der Prognosedaten ergibt, dass sich dies selbst bei Fortführen der Kaufprämie in gleicher Höhe bis 2027 nicht ändern würde.

Zuvor wurden in diesem Arbeitspaket die Gesamtbetriebskosten der verschiedenen Szenarien bei einer Standard-Batteriepreiseinstellung miteinander verglichen. Die gezeigten Unterschiede lassen sich auf die persönlichen Erwartungen der Entscheidungsträger zurückführen. Das Szenario „grüner Innovator“ wirkt sich erwartungsgemäß negativ auf die TCO des Verbrennerfahrzeugs aus, da diese Auskunftsgruppe einen relativ stärkeren Anstieg künftiger Dieselpreise erwartet. Nichtsdestotrotz liegen die berechneten TCO des Verbrennerfahrzeugs weiterhin unterhalb des reinelektrischen Modells. Die „konservative Beschaffungsgruppe“ schätzt die künftigen Diesel- und Strompreise vergleichsweise gering ein, weshalb dieses Szenario für alle drei Antriebsarten günstig ist. Die „kostenbewusste“ Beschaffungsgruppe erwartet

hingegen den größten Anstieg der Strompreise und einen hohen Anstieg der Dieselpreise. Hierbei lässt sich vermuten, dass kostenbewusste Entscheider risikoscheu sind und daher eine unerwartete Erhöhung von künftigen Kosten vermeiden wollen.

Wie man aus dem Vergleich der Szenarien ableiten kann, ist es relevant, zu welchem Entscheidungstyp die Entscheidungsträger gehören, da sich die TCO für die betrachteten Antriebsarten verändern. Nach den ermittelten Ergebnissen hat dies noch keine Auswirkung auf die optimale Beschaffungsentscheidung. Das Verbrenner-Modell bleibt rein finanziell im Betrachtungszeitraum für das gewählte Nutzungsszenario (15.000 km Laufleistung p.a., 36 Monate Nutzungsdauer) kostenoptimal.

Variation der Laufleistung pro Jahr

Neben den verschiedenen Szenarien und dem Batteriepreis wirkt sich auch die Laufleistung auf die TCO aus. Wie zuvor dargestellt, ist der ermittelte Wertverlust je Kilometer beim BEV mit 4,5 % je 5.000 km am höchsten. Das Verbrennerfahrzeug verliert 1,8 %, und der PHEV 1,1 % je zusätzlicher Laufleistung von 5.000 km.

Tabelle 71 und Tabelle 72 zeigen die TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr bei einer jährlichen Laufleistung von 10.000 km exemplarisch für das Standardszenario mit einer Standardeinstellung für den Batteriepreis.

Tabelle 71: TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr, Laufzeit: 36 Monate, Laufleistung 10.000 km

Jahr	TCO (ICV)	TCO (BEV)	TCO (PHEV)	Delta (BEV-ICV)	Delta (ICV-PHEV)	Delta (BEV-PHEV)
2017	18.344,64 €	21.144,72 €	17.498,67 €	2.800,07 €	845,97 €	3.646,05 €
2018	18.544,83 €	20.492,90 €	17.584,06 €	1.948,06 €	960,77 €	2.908,83 €
2019	18.769,94 €	19.983,56 €	17.687,25 €	1.213,62 €	1.082,69 €	2.296,31 €
2020	18.957,45 €	23.663,95 €	20.746,73 €	4.706,51 €	- 1.789,29 €	2.917,22 €
2021	19.138,71 €	23.824,81 €	20.925,45 €	4.686,10 €	- 1.786,74 €	2.899,36 €
2022	19.321,35 €	23.988,30 €	21.105,92 €	4.666,95 €	- 1.784,57 €	2.882,37 €
2023	19.505,41 €	24.154,44 €	21.288,18 €	4.649,03 €	- 1.782,78 €	2.866,26 €
2024	19.705,70 €	24.324,37 €	21.483,85 €	4.618,67 €	- 1.778,15 €	2.840,52 €
2025	19.921,99 €	24.498,10 €	21.692,74 €	4.576,11 €	- 1.770,76 €	2.805,36 €
2026	20.154,02 €	24.675,65 €	21.914,68 €	4.521,64 €	- 1.760,66 €	2.760,98 €
2027	20.386,79 €	24.855,97 €	22.137,91 €	4.469,18 €	- 1.751,12 €	2.718,06 €

Wie man Tabelle 71 entnehmen kann, hat die jährliche Laufleistung einen Einfluss auf die optimale Beschaffungspolitik: Anders als bei einer Laufleistung von 15.000 km, wie zuvor angenommen, ist nun nicht mehr durchgängig der ICV die kostenoptimale Beschaffungslösung. In den Jahren 2017, 2018 und 2019 erweist sich der PHEV als kostenoptimal. Diese Lösung hat Gesamtbetriebskosten von 212.750,82 €. Abbildung 123 verdeutlicht die Kostenunterschiede.

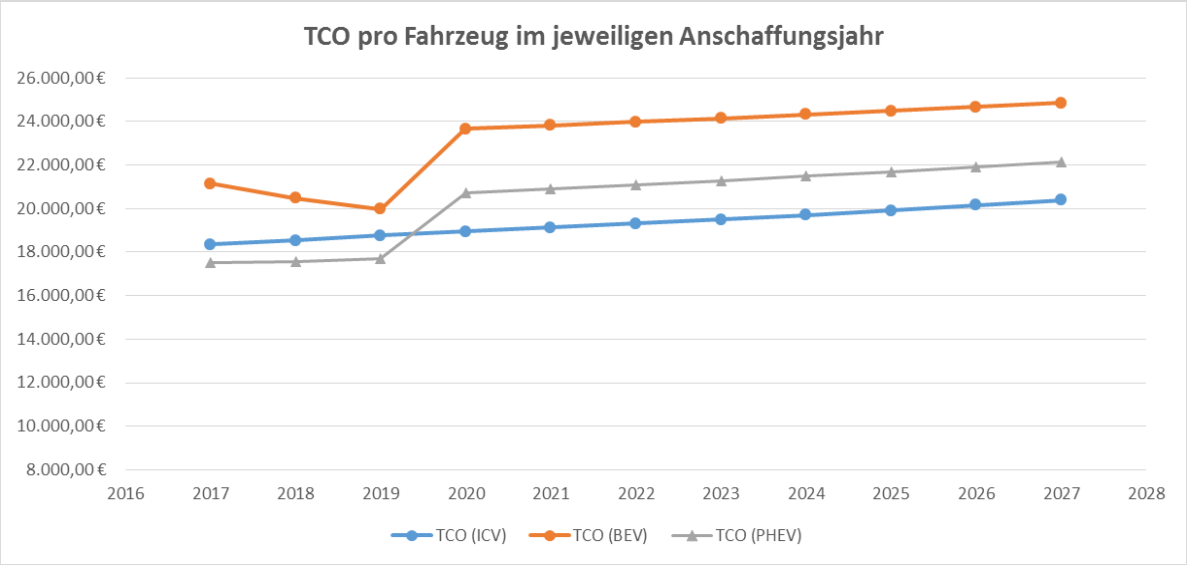


Abbildung 123: TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr, Laufzeit: 36 Monate, 10.000 km Laufleistung

Bei einer Laufleistung von 20.000 km ist hingegen die Beschaffung eines ICV durchgängig bis ins Jahr 2030 kostenoptimal, wie Tabelle 72 zeigt.

Tabelle 72: TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr pro Fahrzeug, Laufzeit: 36 Monate, Laufleistung: 20.000 km

Jahr	TCO (ICV)	TCO (BEV)	TCO (PHEV)	Delta (BEV-ICV)	Delta (ICV-PHEV)	Delta (BEV-PHEV)
2017	23.300,95 €	28.695,70 €	25.168,62 €	5.394,76 €	- 1.867,67 €	3.527,08 €
2018	23.625,85 €	27.855,94 €	25.340,05 €	4.230,09 €	- 1.714,20 €	2.515,89 €
2019	23.952,42 €	27.204,01 €	25.532,66 €	3.251,60 €	- 1.580,25 €	1.671,35 €
2020	24.247,35 €	30.841,43 €	28.696,72 €	6.594,08 €	- 4.449,37 €	2.144,71 €
2021	24.527,76 €	31.089,86 €	29.001,92 €	6.562,10 €	- 4.474,16 €	2.087,94 €
2022	24.808,88 €	31.341,14 €	29.308,78 €	6.532,26 €	- 4.499,90 €	2.032,36 €
2023	25.090,77 €	31.595,34 €	29.617,37 €	6.504,57 €	- 4.526,60 €	1.977,97 €
2024	25.403,05 €	31.854,69 €	29.950,92 €	6.451,64 €	- 4.547,87 €	1.903,77 €
2025	25.745,21 €	32.119,21 €	30.309,03 €	6.374,00 €	- 4.563,82 €	1.810,17 €
2026	26.116,74 €	32.388,90 €	30.691,34 €	6.272,17 €	- 4.574,60 €	1.697,56 €
2027	26.487,60 €	32.661,65 €	31.074,33 €	6.174,04 €	- 4.586,73 €	1.587,31 €

Die Gesamtbetriebskosten betragen bei dieser Lösung 273.306,59 €. Auch bei einer jährlichen Laufleistung von 25.000 km bleibt die optimale Beschaffungsstrategie gleich. Die Kosten erhöhen sich jedoch auf 297.685,40 €.

Tabelle 73 zeigt, dass sich das Kostendelta zwischen BEV und ICV bzw. dem PHEV und ICV im Vergleich zur geringeren jährlichen Laufleistung von 20.000 km vergrößert hat.

Tabelle 73: TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr je Fahrzeug, Laufzeit: 36 Monate, Laufleistung: 25.000 km

Jahr	TCO (ICV)	TCO (BEV)	TCO (PHEV)	Delta (BEV-ICV)	Delta (ICV-PHEV)	Delta (BEV-PHEV)
2017	25.779,10 €	32.471,20 €	29.003,60 €	6.692,10 €	- 3.224,50 €	3.467,60 €
2018	26.166,36 €	31.537,46 €	29.218,05 €	5.371,10 €	- 3.051,69 €	2.319,42 €
2019	26.543,66 €	30.814,24 €	29.455,37 €	4.270,59 €	- 2.911,71 €	1.358,87 €
2020	26.892,31 €	34.430,18 €	32.671,72 €	7.537,87 €	- 5.779,41 €	1.758,46 €
2021	27.222,29 €	34.722,38 €	33.040,16 €	7.500,09 €	- 5.817,87 €	1.682,22 €
2022	27.552,64 €	35.017,56 €	33.410,21 €	7.464,92 €	- 5.857,56 €	1.607,36 €
2023	27.883,45 €	35.315,80 €	33.781,97 €	7.432,34 €	- 5.898,51 €	1.533,83 €
2024	28.251,73 €	35.619,85 €	34.184,45 €	7.368,13 €	- 5.932,72 €	1.435,40 €
2025	28.656,82 €	35.929,76 €	34.617,18 €	7.272,94 €	- 5.960,36 €	1.312,58 €
2026	29.098,10 €	36.245,53 €	35.079,67 €	7.147,43 €	- 5.981,57 €	1.165,86 €
2027	29.538,01 €	36.564,48 €	35.542,55 €	7.026,47 €	- 6.004,54 €	1.021,94 €

Auch eine jährliche Laufleistung von 30.000 km ändert nichts an der optimalen Beschaffungspolitik und erhöht abermals die Kosten zu Gunsten des ICV-Modells, Tabelle 74.

Tabelle 74: TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr je Fahrzeug, Laufzeit: 36 Monate, Laufleistung: 30.000 km

Jahr	TCO (ICV)	TCO (BEV)	TCO (PHEV)	Delta (BEV-ICV)	Delta (ICV-PHEV)	Delta (BEV-PHEV)
2017	28.257,25 €	36.246,69 €	32.838,57 €	7.989,44 €	- 4.581,32 €	3.408,12 €
2018	28.706,87 €	35.218,99 €	33.096,04 €	6.512,12 €	- 4.389,17 €	2.122,95 €
2019	29.134,90 €	34.424,47 €	33.378,08 €	5.289,57 €	- 4.243,18 €	1.046,39 €
2020	29.537,26 €	38.018,92 €	36.646,72 €	8.481,66 €	- 7.109,46 €	1.372,20 €
2021	29.916,82 €	38.354,90 €	37.078,39 €	8.438,09 €	- 7.161,57 €	1.276,51 €
2022	30.296,41 €	38.693,99 €	37.511,64 €	8.397,58 €	- 7.215,23 €	1.182,35 €
2023	30.676,14 €	39.036,25 €	37.946,56 €	8.360,11 €	- 7.270,43 €	1.089,68 €
2024	31.100,40 €	39.385,02 €	38.417,98 €	8.284,61 €	- 7.317,58 €	967,03 €
2025	31.568,43 €	39.740,31 €	38.925,32 €	8.171,88 €	- 7.356,89 €	814,99 €
2026	32.079,46 €	40.102,16 €	39.468,00 €	8.022,70 €	- 7.388,55 €	634,15 €
2027	32.588,42 €	40.467,32 €	40.010,76 €	7.878,90 €	- 7.422,34 €	456,56 €

Variation der Laufzeit

Eine weitere Veränderung zeigt sich bei der Variation der Laufzeit im Sinne der Nutzungs- bzw. Leasingdauer der betrachteten Fahrzeuge. Bisher wurde für die Analyse der Ergebnisse eine Standardlaufzeit von 36 Monaten angenommen.

Senkt man die Laufzeit bei einer jährlichen Laufleistung von 15.000 km auf 12 Monate, so ändert das die optimale Beschaffungspolitik. Wie man in Abbildung 124 erkennt, ist der BEV bis zum Auslaufen der Prämie im Jahr 2019 kostenoptimal, ab 2020 ist wieder der ICV die kostenoptimale Beschaffungsentscheidung. Die resultierende kostenoptimale Beschaffungspolitik bedeutet Gesamtbetriebskosten in Höhe von 114.742,14 €.

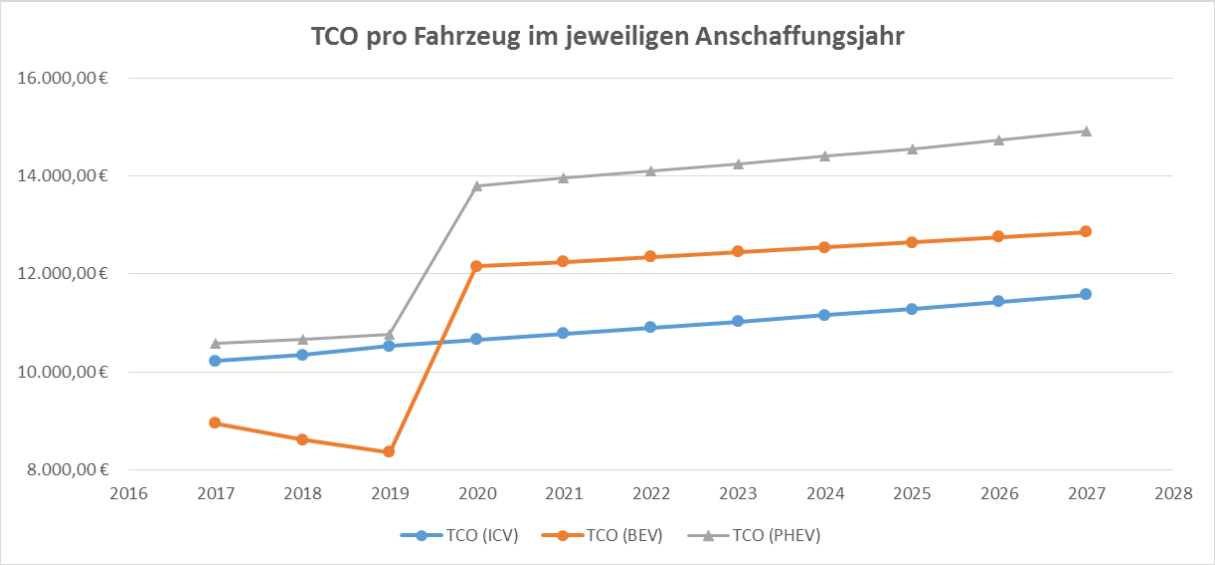


Abbildung 124: TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr, Laufzeit 12 Monate, 15.000 km

Bei der Beschaffungspolitik einer Antriebsart über den gesamten Planungshorizont erweist sich der ICV mit Kosten von 119.916,24 € wiederum als die kostenoptimale Alternative.

Mit einer nun angenommenen Laufzeit von 24 Monaten verändern sich die Ergebnisse abermals. Der Break Even Point der drei Antriebsarten ist hier im Jahr 2019 aufgrund der modellierten Fördermaßnahmen erreicht. Die TCO des PHEV und des BEV steigen nach dem Auslaufen der Kaufprämie an, sodass der ICV kostenoptimal bleibt. Diese kostenoptimale Beschaffungspolitik verursacht Kosten von 181.472,30 € im Betrachtungszeitraum.

Die Entwicklung der TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr ist in Abbildung 125 noch einmal grafisch illustriert.

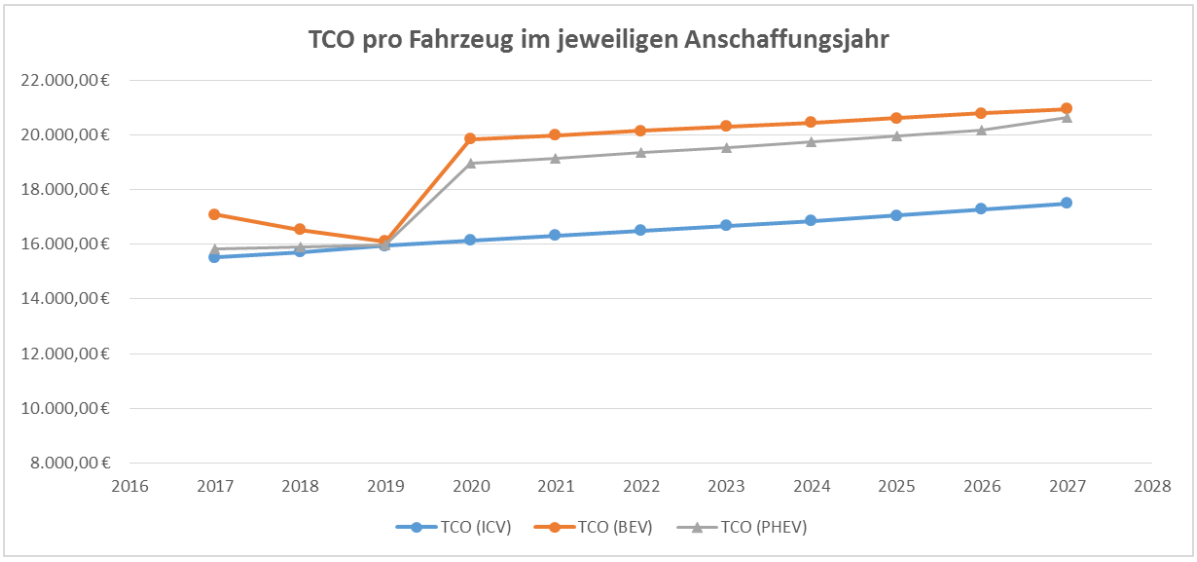


Abbildung 125: TCO pro Fahrzeug im jeweiligen Anschaffungsjahr, Laufzeit: 24 Monate, 15.000 km

Bei der Anschaffung einer Antriebsart über den gesamten Beschaffungshorizont dominiert wiederum der ICV. Ab einer Laufzeit von 36 Monaten bei einer jährlichen Laufleistung von 15.000 km bleibt die Anschaffung des ICV die kostenoptimale Wahl. Das Ergebnis ändert sich mit steigender Laufzeit und Laufleistung nicht mehr, wie Abbildung 126 für eine Laufzeit von 48 Monaten zeigt.

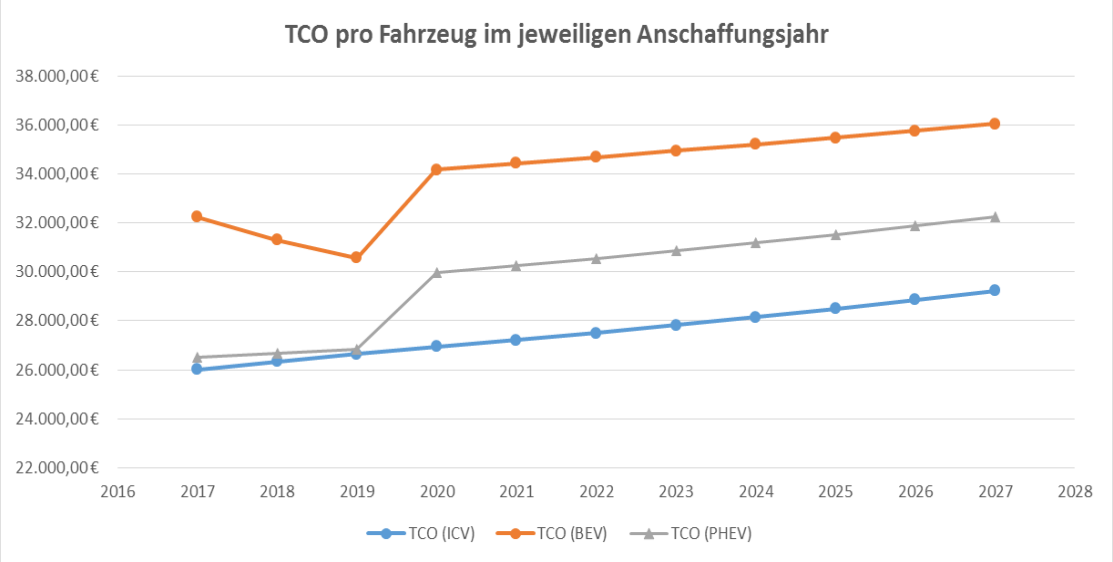


Abbildung 126: TCO im jeweiligen Anschaffungsjahr pro Fahrzeug, Standardszenario, Laufzeit: 48 Monate

Bei einer Laufzeit von 48 Monaten liegt der PHEV in den Jahren 2017 und 2018 in etwa auf dem Niveau des ICV. Nach dem Ende der Kaufprämie in 2019 steigen dessen Kosten jedoch sprunghaft an.

Ergebnisinterpretation aus der Variation von Laufzeit und jährlicher Laufleistung

Bei der Variation von jährlicher Laufleistung und der Laufzeit ist deutlich geworden, dass BEV- und PHEV-Modelle von einer geringen Laufleistung und einer kurzen Haltedauer profitieren. Hier übt die Modellierung des Wertverlustes einen erheblichen Einfluss aus. Der BEV hat im Vergleich zum ICV einen deutlich höheren Wertverlust pro Jahr. Auch sinkt der Wert stärker je Kilometer als beim ICV. Der PHEV ist in seinem Wertverlust pro Jahr mit dem ICV vergleichbar, hat jedoch einen höheren Wertverlust pro gefahrenen Kilometer. Das hat zur Folge, dass der ICV mit zunehmenden Alter und zunehmender Laufleistung einen höheren Restwert aufweist. Daher nimmt die TCO-Differenz zwischen den Antriebsarten ICV und BEV sowie ICV und PHEV mit steigender Laufzeit- und Laufleistung zu. Beim BEV ist vor allem die Laufzeit der entscheidende Kostentreiber, da der Wertverlust pro Jahr besonders hoch ist, während es beim PHEV die Laufleistung ist. Dass die TCO des PHEV in den meisten Fällen unter denen des BEV liegen, ist ebenso durch den Wertverlust zu begründen. Wie gezeigt wurde, unterschreitet der BEV bei einer Laufzeit von 12 Monaten bei 15.000 km jährlicher Laufleistung die Kosten des PHEV. Bereits ab einer Laufzeit von 24 Monaten wird der PHEV zur kostenoptimalen Alternative.

Vergleich der erwarteten Kilometerkosten mit den berechneten Kilometerkosten

Im Rahmen der Befragungen wurden die Erwartungen der Fuhrparkleiter in Bezug auf die Kilometerkosten des konventionellen VW Golf (ICV) und des VW e-Golf (BEV) ausgewertet. Den Einschätzungen liegen eine Laufzeit von vier Jahren und eine Kilometerleistung von 15.000 km jährlich zugrunde. Auch im entwickelten TCO-Modell besteht die Möglichkeit für verschiedene Szenarien die Kilometerkosten auszurechnen. Tabelle 75 zeigt den Vergleich zwischen den aus dem TCO-Tool errechneten Kilometerkosten und den erwarteten Kilometerkosten der befragten Fuhrparkleiter.

Tabelle 75: Kilometerkosten nach TCO-Modell und Erwartungen der befragten Fuhrparkleiter im Vergleich

	Golf TDI 1.6 (ICV)		e-Golf (BEV)	
Jahr	Kosten TCO (€/km)	Erwartungen (€/km)	Kosten TCO (€/km)	Erwartungen (€/km)
2017	0,43	0,47	0,54	0,56
2018	0,44	0,48	0,52	0,56
2019	0,44	0,50	0,51	0,55
2020	0,45	0,51	0,57	0,55
2021	0,45	0,52	0,57	0,55
2022	0,46	0,54	0,58	0,55
2023	0,46	0,55	0,58	0,55
2024	0,47	0,57	0,59	0,55
2025	0,47	0,58	0,59	0,55
2026	0,48	0,59	0,6	0,55
2027	0,49	0,61	0,6	0,55

Wie man aus Tabelle 75 erkennt, schätzen die befragten Fuhrparkleiter die Kilometerkosten für das ICV höher ein als die Berechnungen des TCO Modells ergibt. Für den BEV werden die gesamten Kilometerkosten zunächst höher als im TCO-Modell erwartet. Ab 2019 stabilisieren sie sich auf einem Niveau von 0,55 € je km, was die Berechnungen des TCO-Modell ab 2020 unterschreiten. Es lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die befragten Fuhrparkleiter die künftigen Kilometerkosten des ICV im Vergleich zu den Resultaten des TCO-Modells für das gewählte Szenario überschätzen, und die des BEV tendenziell unterschätzen.

Ergebnisinterpretation zum Vergleich erwarteter Kilometerkosten mit den berechneten Kilometerkosten

Die oben skizzierte Überschatzung künftiger Kilometerkosten des Verbrenner-Modells bei gleichzeitiger Unterschätzung der Kilometerkosten des Elektro-Modells durch die Erhebungseinheiten, lässt sich am ehesten durch abweichende Erwartungen zum Wertverlust und zur künftigen Entwicklung der Batteriekosten zurückführen.

Insgesamt zeigen die Erwartungen der Auskunftspersonen ein optimistisches Szenario für Elektrofahrzeuge. Die befragten Fuhrparkleiter erwarten, dass Elektro-Modelle schon mittelfristig (2022/23) eine kostenoptimale Alternative darstellen. Es ist jedoch zu beachten, dass die hier befragten Fuhrparkleiter bereits erste Erfahrungen mit der Elektromobilität machen konnten und sich durch die Projektteilnahme bereits selbst selektiert haben. Fuhrparkleiter bzw. Erhebungseinheiten mit weniger positiven Erwartungshaltungen dürften sich seltener im Vorhaben engagiert habe. Auf den gesamten relevanten Flottenmarkt kann also anhand der gezeigten Ergebnisse nicht verlässlich geschlossen werden.

Implikationen für die Praxis

Wie die Kostenbetrachtungen gezeigt haben, dominiert die durchgängige Anschaffung des ICV als kostenoptimale Beschaffungsstrategie. Dies ist bei einer Laufzeit von 36 Monaten und einer jährlichen Laufleistung von 15.000 km dem modellierten hohen Wertverlust der Elektro-Modelle geschuldet. Aufgrund des Wertverlustes lohnt sich die Anschaffung des BEV bei kurzen Laufzeiten von 12 Monaten bis zum Auslaufen der Kaufprämie in 2019. Der PHEV ist hingegen kostenoptimal bei einer geringeren jährlichen Laufleistung von 10.000 km während der Perioden mit Kaufprämie.

Demnach zeigt sich ein Zusammenhang zwischen der optimalen Beschaffungsstrategie und der Prämie für Elektrofahrzeuge: Bis 2020 gleichen sich die TCO von BEV und PHEV an diejenigen des ICV an. Für eine Laufleistung von jährlich 10.000 km und einer Laufzeit von 36 Monaten, oder eine Laufleistung von jährlich 15.000 km bei einer Laufzeit von 12 Monaten, sind die Elektro-Versionen für die Zeit der Förderung dem Verbrenner-Modell kostenseitig überlegen – nach dem Ende der Prämie stellt sich dieses Ergebnis nicht mehr ein. Um Elektrofahrzeuge auch langfristig attraktiv zu halten, wäre laut dem angepassten TCO-Modell daher – wie auch beim Grundmodell (AP 4600) vorgeschlagen – eine Verlängerung der Kaufprämie sinnvoll.

Abbildung 127 zeigt die Kostenunterschiede, die sich jeweils zwischen dem ICV und den anderen beiden Antriebsarten im Standardszenario (Laufzeit von 36 Monaten und Laufleistung von 15.000 km pro Jahr) ergeben.

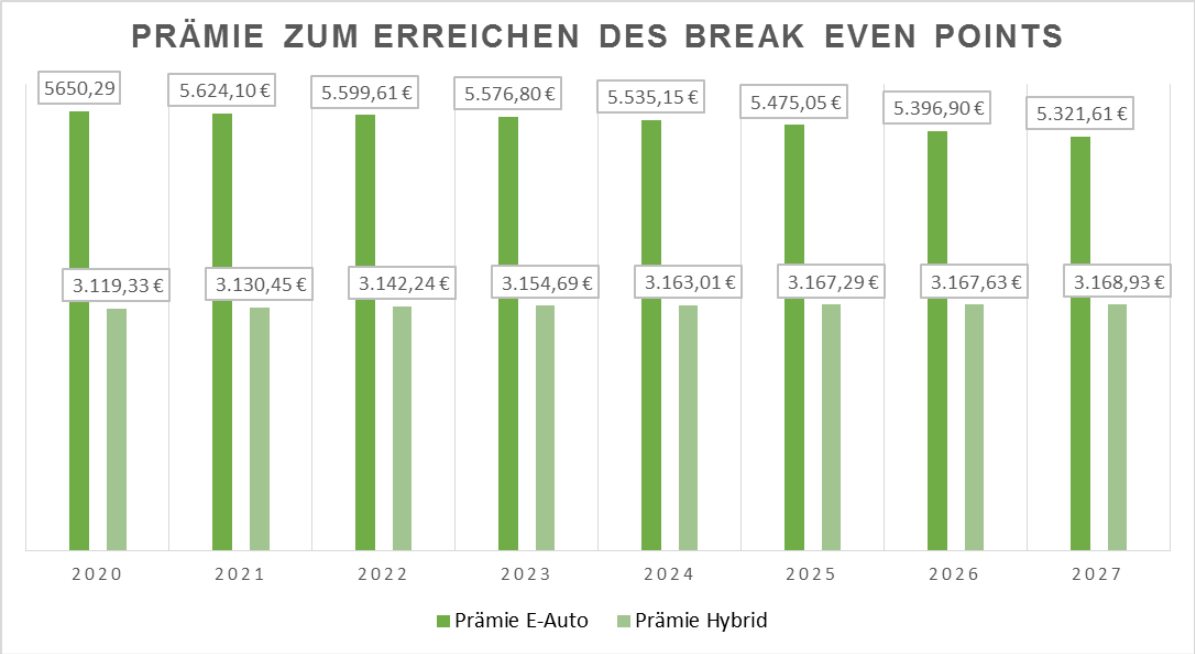


Abbildung 127: Erforderliche Prämie um das Kosten-Delta zum Verbrenner-Modell auszugleichen; Standardszenario, Laufzeit: 36 Monate, Laufleistung: 15.000 km

Anders als im Grundmodell AP 4600 ändert sich der Kostenunterschied zwischen dem ICV und den anderen beiden Antriebsarten nicht nennenswert, sodass eine gestaffelte Prämie nicht dauerhaft zum Erreichen des Break Even Points führen würde.

Kritische Würdigung

Wie bei Grundmodell (AP 4600) wurden Investitionskosten in betriebliche Ladeinfrastrukturen weiterhin vernachlässigt, welche jedoch in eine Gesamtkostenanalyse einfließen müssen. Dies ist auch möglich, da im Rahmen der Befragungen eine entsprechende Forschungsfrage gestellt wurde. Die Kostenposition von Elektro-Modellen würde sich durch die Einbeziehung solcher Kosten verschlechtern.

Die künftige Batteriepreisentwicklung wurde durch eine andere Kurve approximiert, sodass das Preisniveau künftig bei 144 € stagniert. Wie sich der Batteriepreis zukünftig entwickeln wird und welche technischen Innovationen noch entstehen werden, ist unklar und muss weiter beobachtet sowie regelmäßig aktualisiert werden. Gleiches gilt für die Modellierung der realen Wertverlustentwicklung, die durch die geringe Zahl an Elektrofahrzeugen auf den Gebrauchtwagenmärkten fehleranfällig ist und weiter optimiert werden muss.

Zuletzt ist anzumerken, dass sich die hier einbezogenen Erwartungen der Entscheidungsträger subjektiv und nicht repräsentativ für die Entscheidungsträger des relevanten Flottenmarktes sind. Allerdings bilden sie mit hinreichender Genauigkeit die frühe Nachfrage nach Elektrofahrzeugen von Flottenbetreibern ab.

Implikationen

Mit dem erweiterten TCO-Modell wurde das Ziel verfolgt, aufbauend auf dem Grundmodell (AP 4600) schrittweise eine realitätsnähere Modellierung der einzelnen Parameter zu gewährleisten. Das Grundmodell wurde um die Erwartungen einer großen Zahl befragter Entscheidungsträger ergänzt, ein Plug In-Hybrid-Modell wurde implementiert und einige Anpassung im Hinblick auf die Batteriepreisentwicklung und den Wertverlust vorgenommen. Folgende Implikationen lassen sich aus den durchgeführten Analysen ableiten:

- Die TCO sind generell höher als im Grundmodell angenommen. Dies liegt an den Erwartungen der befragten Entscheidungsträger zu den künftigen Diesel- und Strompreisen. Die Erwartungen übertreffen die historisch fundierten Parameter aus dem Grundmodell. Ein Strompreisanstieg für Industriestromkunden erscheint aus heutiger Sicht eher unwahrscheinlich, sodass sich hierdurch die Kostenposition von Elektro-Modellen relativ verbessern würde.

- Die gezeigten Szenarien verdeutlichen, dass unterschiedliche Beschaffungstypen auch unterschiedliche Erwartungen an die Entwicklung verschiedener Kostengrößen in der Zukunft haben. Die Segmentierung des Flottenmarktes anhand der präsentierten Beschaffungstypen erscheint zur Verbreitung von Elektrofahrzeugen in Flotten lohnenswert.

- Anders als bei Grundmodell ergeben die Ergebnisse der TCO-Analyse mit dem erweiterten Modell, dass Elektrofahrzeuge nur bei geringen jährlichen Laufleistungen und kurzen Laufzeiten eine kostenoptimale Alternative sind. Dieses Ergebnis ist auf die angepasste Wertverlustmodellierung zurückzuführen, die einen überdurchschnittlich hohen Wertverlust bei Elektro- und Hybridfahrzeugen unterstellt.

- Vergleicht man die TCO von Plug-In-Hybrid- und reinelektrischem Modell, erweist sich der Plug In-Hybrid in den meisten Fällen kostenoptimal.

- Die Variation der Batteriepreisentwicklung um +10% oder -10% übt im Standardszenario mit einer Laufleistung von 15.000 km und Laufzeit von 36 Monaten keinen Einfluss auf die optimale Beschaffungsstrategie aus.

- Unter Anwendung der zuvor abgeleiteten Parameter reicht die heute verfügbare staatliche Prämie in den meisten Fällen nicht aus, um die TCO der Elektro-Modelle auf das Niveau des Verbrenner-Modells zu drücken. Mit den hier einbezogenen Erwartungen der befragten Auskunftspersonen und Parameteranpassungen wird – anders als im Grundmodell – eine dauerhafte Förderung der Elektro-Modelle notwendig.

3.1.22 AP 5100 Fahrzeugaufrüstung

Unter dem Arbeitspaket 5100 wurde die gesamte Fahrzeugaufrüstung der im Zeitraum des Forschungsprojektes vermessenen Flottenfahrzeuge zusammengefasst. Dies umfasst sowohl die Montage der sensorbasierten Datenlogger, den eigentlichen Einbau vor Ort beim Fahrzeughalter als auch die Inbetriebnahme beim Kunden vor Ort.

3.1.23 AP 5110 Fahrzeugaufrüstung sensorbasierte Datenlogger

Die gesamte Aufrüstung der Projektfahrzeuge aus Fahrzeugflotten mit den in Abschnitt 3.1.1 aufgeführten sensorbasierten Datenloggern wurde im Arbeitspaket 5110 strukturiert und zusammengefasst. Insgesamt wurde in der Projektlaufzeit vom April 2015 bis zum Ende Dezember 2016 eine Anzahl von 232 Datenloggern in 196 Flottenfahrzeuge von 127 Projektteilnehmern verbaut. Aus dem proportionalen Vergleich der Anzahl der verbauten Datenlogger mit der Anzahl der Flottenfahrzeuge folgt, dass bei einigen Projektfahrzeugen im Erfassungszeitraum ein Austausch des eingesetzten Datenloggers durchgeführt wurde. Dies war bedingt durch äußere Beschädigungen z.B. durch Spritzwasser. Hierdurch lieferten einige Datenlogger keine Datensätze mehr an den Projektserver. Diese Messsysteme wurden dann mit einem neuen System ersetzt.

Von den 196 Flottenfahrzeugen wurden 27 Fahrzeuge als Dienstwagen eingesetzt. Die übrigen 169 Fahrzeuge wurden als Poolfahrzeuge in einem Unternehmensfuhrpark verwendet. Aus der Verteilung der Projektfahrzeuge auf die Projektteilnehmer geht hervor, dass sowohl einzelne als auch mehrere Fahrzeuge einer Fahrzeugflotte der Projektteilnehmer am Projekt teilnahmen und mit Datenloggern ausgerüstet wurden. Die Aufrüstung fand dabei nach Übergabe der Leasingfahrzeuge dezentral bei jedem Kunden vor Ort durch Mitarbeiter des Lehrstuhls für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen statt. Vor jedem Verbau beim Kunden erfolgte eine Kontaktaufnahme, um kurz- und langfristig Termine für die Ausrüstung der Projektfahrzeuge zu vereinbaren. Durch den Verbau des Messsystems beim Kunden vor Ort wurde die alltägliche Fahrzeugnutzung lediglich minimal gestört.

Die Funktionsfähigkeit der verbauten Logger-Systeme wurde sowohl vor als auch nach dem Verbau beim Kunden persönlich durch Mitarbeiter des Lehrstuhls für Mechatronik festgestellt. Dabei wurde auch die Korrektheit der Messdaten überprüft.

In Abbildung 128 ist die prozentuale Verteilung der verbauten Datenlogger pro Fahrzeugtyp dokumentiert. Die Mehrheit entfällt mit ca. 63,3% der ausgestatteten Fahrzeuge auf den Fahrzeugtyp „REX“[74]. Den

[74] Batterieelektrisches Fahrzeug mit **R**ange **Ex**tender.

zweitgrößten Anteil der mit sensorbasierten Datenloggern ausgerüsteten Fahrzeuge haben die „BEVs“[75] mit ca. 36,2%. Einen mit 0,5% geringen Anteil nehmen Plug-In-Hybride, kurz „PHEV“[76] ein. Grundlage für diese Verteilung hinsichtlich batterieelektrischer Antriebsvarianten stellte die hohe Leasingnachfrage nach diesen Fahrzeugtypen dar.

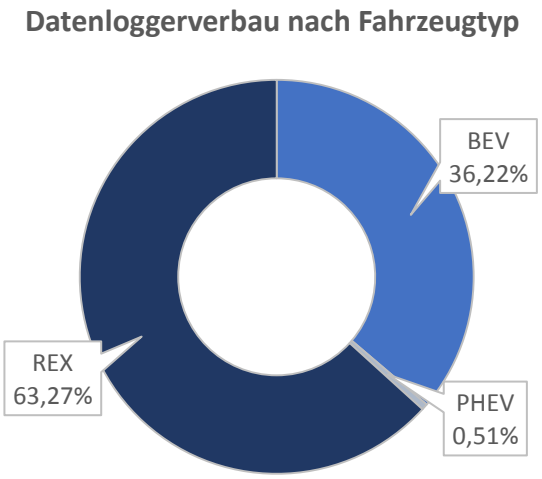


Abbildung 128: Verteilung der Datenlogger auf unterschiedliche Fahrzeugtypen

Eine ähnlich starke Ausprägung lässt sich auch bei der Verteilung der sensorbasierten Datenlogger nach Fahrzeugmodellen erkennen. Wie in Abbildung 129 zu erkennen ist, setzt sich die gesamte Verteilung des Fahrzeugtyps „REX“ aus BMW i3 mit Range Extender zusammen. Weiterhin entfiel ein Großteil der ausgestatteten BEV auf dieses Fahrzeugmodell ohne den Zusatz eines Range Extenders. Dies lässt sich im Wesentlichen durch die Popularität dieses Fahrzeugmodells im Bereich der Elektromobilität erklären. Wie der Statistik zu entnehmen ist, kann die Mehrheit der ausgerüsteten Fahrzeuge den Fahrzeugsegmenten Kleinwagen zugeordnet werden. Ausnahmen sind mit lediglich ca. 5% Utilities-Fahrzeuge wie der Renault Kangoo Z.E., mit ca. 2% Fahrzeuge der Kompaktklasse wie der Nissan Leaf sowie ein Plug-In-Hybrid der Klasse Van wie der Ford CMAX Energi und ein Modell der Oberklasse, das Tesla Model S.

[75] **B**attery **E**lectric **V**ehicle

[76] **P**lug-In-**H**ybrid **E**lectric **V**ehicle

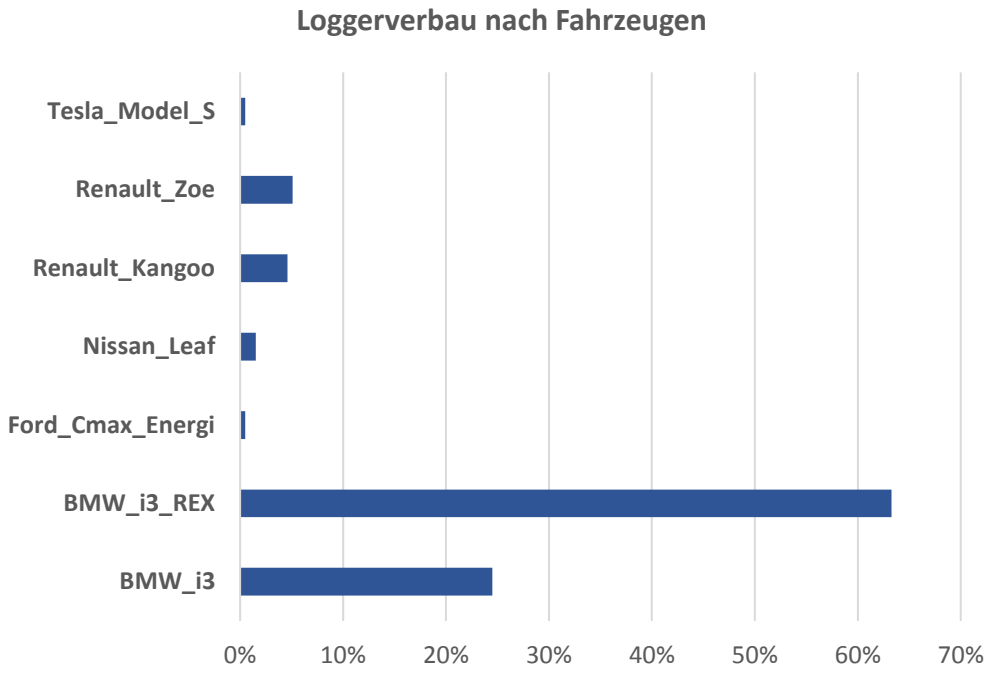


Abbildung 129: Verteilung der Datenlogger auf unterschiedliche Fahrzeugmodelle

Aus der Verteilung der im Projekt mit sensorbasierten Datenloggern bestückten Fahrzeuge lässt sich folglich eine klare Tendenz hin zu mobilen Klein- bis Kompaktwagen erkennen. Diese Fahrzeuge werden vornehmlich bei mittelständischen- bzw. Großunternehmen eingesetzt, wie Abbildung 130 zeigt. Begründet werden kann dies in erster Linie durch geringe bzw. nichtexistierende Fahrzeugflotten bei Klein- und Kleinstunternehmen. Die Angabe der Unternehmensgröße entstammt der parallel durchgeführten Nutzerbefragung durch die Universität Duisburg-Essen. Der Eintrag „NA“ beschreibt unbekannte Unternehmensgrößen, was z.B. aus fehlenden Information über das jeweilige Unternehmen resultiert.

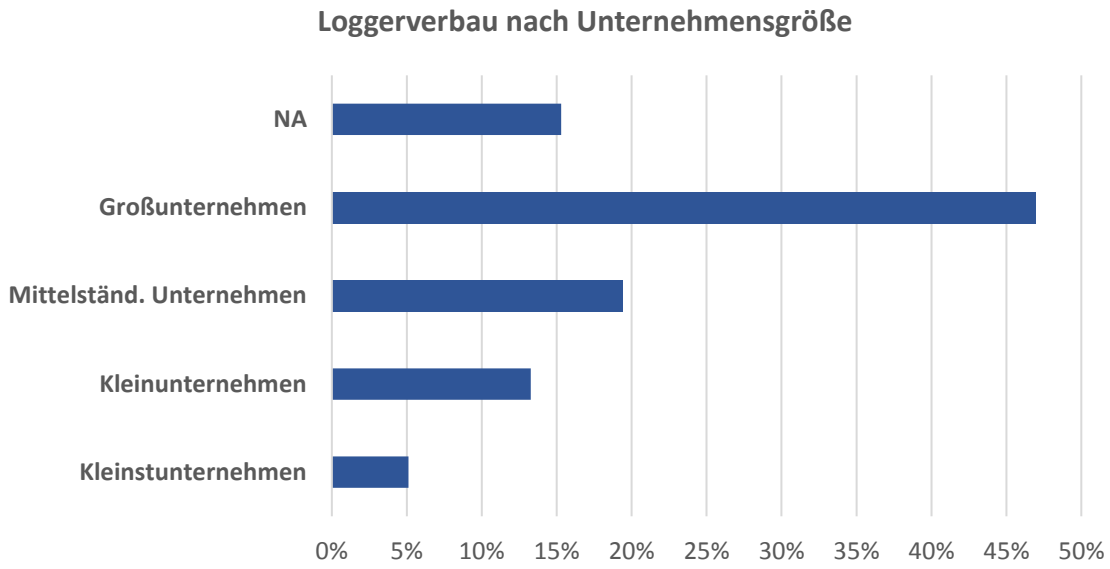


Abbildung 130: Verteilung der Datenlogger auf unterschiedliche Unternehmensgrößen

Dieses Bild wird auch durch die Verteilung der Datenlogger nach der Fuhrparkgröße der Unternehmen unterstrichen (vgl. Abbildung 131). Annähernd 50% der mit einem sensorbasierten Datenlogger ausgerüsteten Flottenfahrzeuge befinden sich in einem Fuhrpark mit mehr als 20 Fahrzeugen, wobei die Mehrheit in Fuhrparks mit mehr als 100 Fahrzeugen aufzufinden ist. Unter Ausblenden des ca. 16%-igen Anteils an Fahrzeugen in unbekannter Fuhrparkgröße ergibt sich daraus eine gewichtete Verteilung von ca. 56% auf die zuvor beschriebene Spannweite an Fuhrparkfahrzeugen.

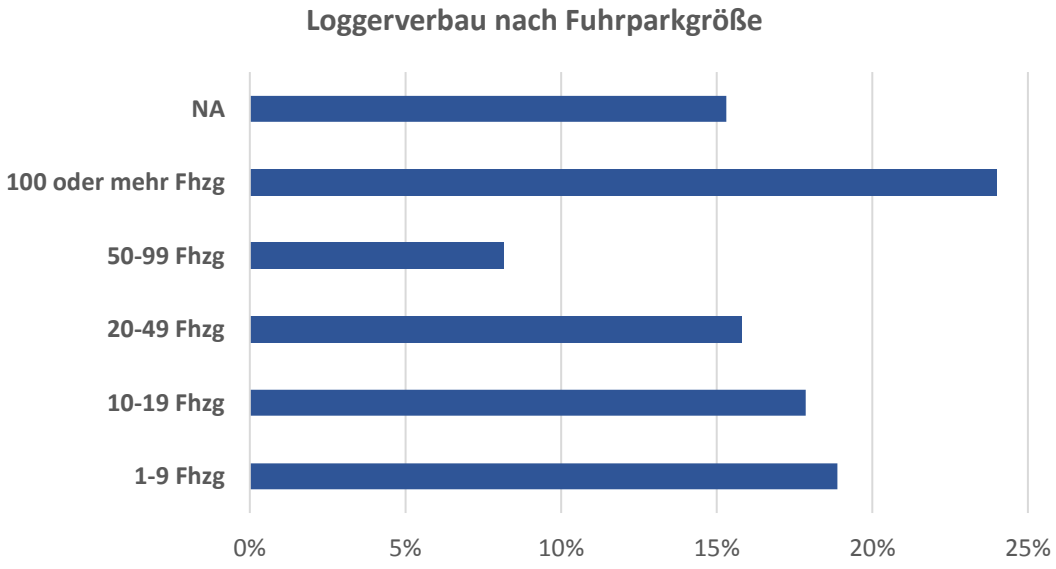


Abbildung 131: Verteilung der Datenlogger nach Fuhrparkgrößen

Dies lässt darauf schließen, dass gerade die Fuhrparkleiter der relativ großen Fahrzeugflotten Potentiale in der Elektromobilität hinsichtlich einer Absenkung des Emissionsausstoßes der Gesamtflotte erkennen. Ebenfalls könnte diese Verteilung dadurch begründet sein, dass in diesen Fuhrparks ausreichend konventionelle Flottenfahrzeuge für die Reichweite der Elektrofahrzeuge übersteigende Fahrstrecken zur Verfügung standen. Weiterhin fällt auf, dass im Bereich von Fuhrparks mit weniger als 50 Fahrzeugen die Mehrheit der Elektrofahrzeuge in sehr kleinen Fahrzeugpools von 1 bis 9 Fahrzeugen aufzufinden ist. Das bedeutet, dass z.B. bei Freiberuflern neben dem Elektrofahrzeug gegebenenfalls nur ein konventionell betriebenes Fahrzeug oder aber ausschließlich das Elektrofahrzeug für gewerbliche Dienstgänge eingesetzt wird.

Die Verteilung der beteiligten Firmen auf unterschiedliche Branchen in Deutschland in Abbildung 132 zeigt, dass einige Bereiche besonders stark vertreten sind. So entfallen auf die Branchen „Erbringung von freiberuflichen, wissenschaftlichen und technischen Dienstleistungen“ ca. 6,6%, „Energieversorgung“ ca. 8,7%, „Verkehr und Lagerei“ ca. 9,1%, „Erziehung und Unterricht“ ca. 9,1 %, „öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung“ ca. 16,8% sowie „verarbeitendes Gewerbe“ ca. 19,4% der Projektfahrzeuge, die vermessen wurden.

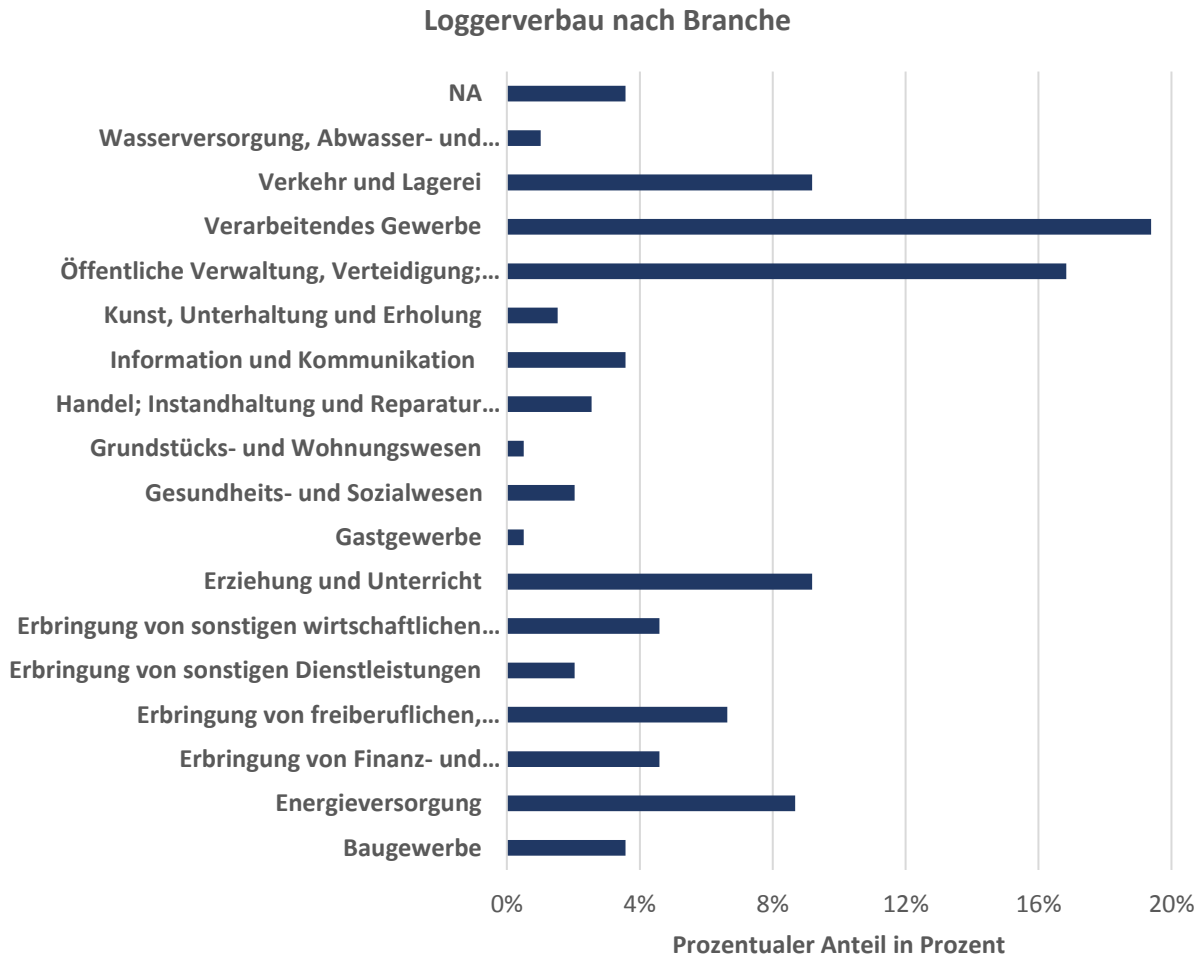


Abbildung 132: Verteilung der Datenlogger auf die Branchen der Fahrzeugflotten

Dies kann in erster Linie durch das Vorhandensein einer Fahrzeugflotte in diesen Branchen erläutert werden. In Unternehmen, die z.B. im Gastgewerbe tätig sind, erscheint der Betrieb einer eigenen Flotte meist nicht sinnvoll. Entgegen dieses Trends ist die Verteilung auf Freiberufler dennoch ausgeprägt, obwohl diese häufig keine eigene Fahrzeugflotte unterhalten. Begründet werden kann dies durch die relativ hohe Schnittmenge, die in dem Branchenfeld „Erbringung von freiberuflichen, wissenschaftlichen und technischen Dienstleistungen“ zusammengefasst wurden. So werden auch teilnehmende Universitäten und Forschungseinrichtungen mit ihren Fahrzeugflotten zu diesem Themengebiet gezählt. Ebenfalls kann eine Ausprägung bei Branchen mit besonderer Beziehung zur Elektromobilität, wie z.B. bei den Energieversorgern, ausgemacht werden, deren Nähe des eigenen Geschäftsmodells zur Elektromobilität zusätzlich treibend ist.

Allgemein lässt sich festhalten, dass durch die getroffene Verteilung der sensorbasierten Datenlogger auf die Flottenfahrzeuge eine breite, repräsentative Stichprobe abgedeckt wird. Besonders der hohe Anteil an batterieelektrischen Fahrzeugen erlaubt eine fundierte Analyse des Mobilitätsverhaltens der Fahrzeugnutzer mit eben diesem Fahrzeugtyp.

3.1.24 AP 5200 Bereitstellung und Konfiguration von Smartphones

Das Ziel des Arbeitspaketes 5200 stellte die Bereitstellung und Konfiguration von Smartphones zum Einsatz als zusätzliche Datenlogger dar. Dieses Vorhaben erschien besonders unter den zum Ende des Abschnittes 3.1.3 erwähnten Vorteilen einer Smartphone-Applikation attraktiv. Im Zuge dieses Arbeitspaketes wurde daher eine Liste mit geeigneten Smartphone-Modellen erstellt, deren Ausstattung hinsichtlich verbauter Sensorik und Prozessorleistung für die Smartphone-Applikation passend erschien. Einhergehend mit dem Potential einer Smartphone-basierten Aufzeichnung der Fahrprofile trat jedoch der zeitliche Mehraufwand zur Anpassung der Smartphone-Applikation an verschiedene Android-Versionen sowie zum Debugging der Software in den Vordergrund. Besonders die Übermittlung der aufgenommenen Fahrdaten an einen Server erwies sich als fehleranfällig und aus Sicht des Datenschutzbeauftragten der Universität Duisburg-Essen in Form einer Android-Applikation problematisch. Dementsprechend wurde mit dem bestehenden Projektteam eine weitere Bearbeitung des Arbeitspaketes 2400 über den Beta-Zustand hinaus nicht fortgeführt, so dass eine Bereitstellung und Konfiguration von Smartphones zur Datenaufzeichnung hinfällig wurde.

3.1.25 AP 5300 Aufbau und Bereitstellung zusätzlicher Datenlogger

Die objektiven Fahrdaten der Flottenfahrzeuge, die im Zuge dieses Forschungsprojektes als Datengrundlage für die technische Begleitforschung dienen, wurden mit Hilfe von am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen entwickelten Datenloggern aufgenommen. Die Detaillierung und Umsetzung dieser Datenlogger erfolgte im Auftrag durch eine Drittfirma unter Berücksichtigung der festgelegten Rahmenbedingungen aus Abschnitt 3.1.1. Da im Rahmen des Projekts Fahrzeuge verschiedener Hersteller

eingesetzt werden sollten, war eine vom CAN-Bus unabhängige Lösung zur Messung der benötigten Daten notwendig. Dazu wurde ein Sensorkonzept erarbeitet, welches unabhängig vom Fahrzeugtyp und -hersteller verbaut werden konnte. Der Betrieb des Datenloggers sollte völlig autark und ohne Kenntnisnahme durch den Fahrer erfolgen. Dementsprechend war als Schnittstelle zum Fahrzeug lediglich eine Energieversorgung über das 12 V-Bordnetz vorgesehen.

Damit sich das zuvor beschriebene Konzept für einen möglichen Verbau im Motorraum des Fahrzeugs sowie hinter Teilen der Cockpitverkleidung eines üblichen Fahrzeugs eignet, wurden maximale Abmessungen nach Definition in Abschnitt 3.1.1 festgelegt. Die Platzierung der Antennen des GSM- bzw. GPS-Moduls erfolgte in den Außenfenstern des Kofferraums der Projektfahrzeuge, so dass die Sicht der Fahrer uneingeschränkt gewährleistet und die Signalstärke dennoch ausreichend hoch war.

Der Datenlogger bestand im Wesentlichen aus einem Haupt-Modul sowie zwei sogenannten Satelliten-Modulen. Das Haupt-Modul beherbergt die Zentralplatine, auf der unter anderem Microcontroller, GPS-Sensorik, GSM-Modul sowie eine SD-Karte zur Zwischenspeicherung der Messdaten verbaut sind. Weiterhin besitzt die Zentraleinheit des Datenlogger-Systems jeweils eine Datenleitung zu den externen Sensoren, um über eine geeignete Schnittstelle mit diesen zu kommunizieren und die Messwerte entgegenzunehmen. Die Basiskomponente ist in Abbildung 133 dargestellt.

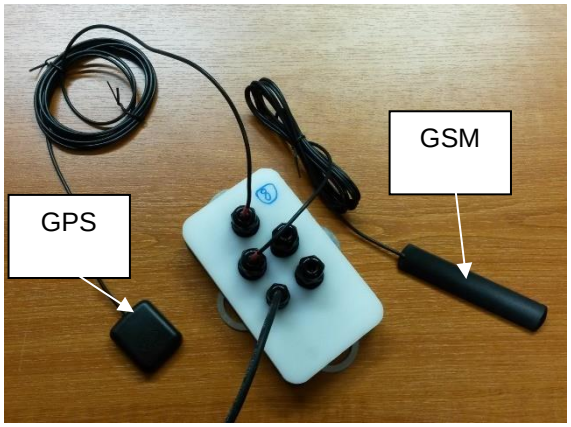


Abbildung 133: Haupt-Modul mit Mikrocontroller und GPS- bzw. GSM-Antenne

Der Zusammenschluss aus der Haupteinheit mit den externen Sensoren stellte das Gesamtsystem „sensorbasierter Datenlogger“ dar.

Als GPS-Sensorik wurde, wie in Abschnitt 3.1.1 bereits erwähnt, die Hardware SIM968 eingesetzt, welche eine Genauigkeit von 2,5 Meter in der Positionierung bzw. 0,1 m/s in der Geschwindigkeit gewährleistet. Die Gesamtheit aller Messgrößen, die durch den GPS-Sensor erfasst werden, ist in Tabelle 76 beschrieben:

Tabelle 76: Datenlogger PREMIUM – GPS-Datensatz

Messgröße	**Bedeutung**
Zeit (UTC)	Aktuelle Uhrzeit in der koordinierten Weltzeit
Status	Information, ob die GPS-Messung gültig ist
Qualität	Angabe über die Qualität der GPS-Messung
Anzahl der benutzten Satelliten	Angabe der Anzahl der benutzten Satelliten
Breitengrad	Breitengrad in Grad und Minuten
Ausrichtung Breitengrad	Ausrichtung des Breitengrades (Nord oder Süd)
Längengrad	Längengrad in Grad und Minuten
Ausrichtung Längengrad	Ausrichtung des Längengrads (West oder Ost)
Horizontale Abweichung	Angabe der Horizontalgenauigkeit
Geschwindigkeit über Grund	Geschwindigkeit des GPS-Sensors in Knoten
Kurs über Grund in Grad bezogen auf geografischen Nordpols	Orientierung bezüglich des geografischen Nordpols
Höhe der Antenne	Höhe der GPS-Antenne über den Meeresspiegel
Datum	Aktuelles Datum der GPS-Messung
Magnetische Abweichung	Abweichung in der Magnetfeldmessung
Signalintegrität	Angabe des Signalzustandes

Als weitere Messsensorik wurden zwei Temperaturfühler sowie eine Strommesszange eingesetzt. Beide Sensoren wurden jeweils als „Satellitensensor“ über eine Datenleitung mit der Basiskomponente verbunden (vgl. Abbildung 134). Somit konnten die drei Komponenten räumlich getrennt voneinander im Fahrzeug platziert werden. Bei dem Temperaturfühler handelt es sich um das DS18B20 Digitalthermometer mit einer Genauigkeit von ± 0,5ºC in einem Messbereich von -10ºC bis 85ºC. Die Strommesszange vom Typ CYHCT-C2TV- B400A-32P besitzt einen Messbereich von -400 A bis 400 A bei einer Messungenauigkeit von 1% des Messbereiches.

Abbildung 134: Satellitensensoren Strommesszange mit Temperaturfühler (links) und Temperaturfühler (rechts).

Der Temperaturfühler wurde zur Messung der Außentemperatur eingesetzt. Der Stromwandler konnte aufgeklappt und um die Batterieleitungen herumgelegt werden. Die Messung selbst war jedoch stark von der Temperatur abhängig. Daher ist zur Kompensation dieses Einflusses ein zweiter Temperaturfühler in direktem Umfeld zur Strommesszange integriert. Zur Vermeidung von Störungen in der Datenübertragung werden die Satellitensensoren über eine digitale Kommunikation (serielles Bussystem RS422) mit dem Mikrocontroller verbunden. Der Gehäuseaufbau ist nach IP54 vorgenommen, um einen Betrieb außerhalb der Fahrerkabine zu realisieren.

Im Laufe des Projekts wurden insgesamt 232 Datenlogger aufgebaut. Je Datenlogger-System wurden dabei zwei Temperaturfühler, eine Strommesszange, eine Hauptplatine mit eingeätztem Microcontroller inklusive GPS- bzw. GSM-Modul, eine GSM- und GPS-Antenne sowie drei mit Kunststoff umspritzte Gehäusen verwendet.

3.1.26 AP 5500 Fahrzeugabrüstung

Unter dem Arbeitspaket 5500 wurde die gesamte Fahrzeugabrüstung der im Zeitraum des Forschungsprojektes vermessenen Flottenfahrzeuge zusammengefasst. Dies umfasst sowohl die Demontage der sensorbasierten Datenlogger, den eigentlichen Ausbau vor Ort beim Fahrzeughalter als auch die Überprüfung der Funktionalität des Fahrzeugs beim Kunden vor Ort.

3.1.27 AP 5510 Fahrzeugabrüstung sensorbasierte Datenlogger

Das Arbeitspaket 5510 umfasste die Abrüstung der in die Projektfahrzeuge eingebauten Datenlogger. Wie aus 3.1.23 hervorgeht, wurden in der gesamten Projektlaufzeit im Zeitraum von April 2015 bis Ende Dezember 2016 232 Datenlogger in 196 Flottenfahrzeugen verbaut. Diese Fahrzeuge gehörten zu den Fahrzeugflotten von 127 am Projekt teilnehmenden Unternehmen. Von den 196 Flottenfahrzeugen wurden 27 Fahrzeuge als Dienstwagen eingesetzt. Die übrigen 169 Fahrzeuge wurden als Poolfahrzeuge in einem Unternehmensfuhrpark verwendet. Daraus wird ersichtlich, dass sowohl einzelne als auch mehrere Fahrzeuge einer Flotte mit Datenloggern ausgestattet worden sind.

Um den Fahrbetrieb der Projektteilnehmer nicht zu beeinträchtigen, fand die Abrüstung, wie auch die Ausrüstung zuvor, dezentral bei dem jeweiligen Kunden vor Ort statt. Dazu wurde jeder Kunde im Vorfeld durch unsere Mitarbeiter zwecks einer geeigneten Terminfindung kontaktiert, so dass die Projektteilnehmer kurz- bzw. langfristigen Planungsraum besitzen. Dabei wurden sowohl deutschlandweite Abrüstungsvorgänge mit einer An- und Abreise, als auch in näherer Umgebung der Universität Duisburg-Essen durchgeführt. Der gesamte Ausbau erfolgte ohne direkten Zugriff auf die Komponenten des Projektfahrzeugs, da das gesamte Datenlogger-System völlig losgelöst vom eigentlichen Fahrzeugsystem funktioniert. Somit entstanden keinerlei Beeinträchtigungen des ursprünglichen Fahrzeugzustandes am Projektfahrzeug, so dass alle Fahrzeuge über das Ende der Projektlaufzeit hinaus als Flottenfahrzeuge eingesetzt werden können. Zum Zeitpunkt Ende September 2017 wurde der Großteil der ausgerüsteten Datenlogger aus den Projektfahrzeugen entfernt. Derzeit befinden sich noch 70 Datenlogger in Projektfahrzeugen, wobei diese aufgrund mangelnden SIM-Karten-Guthabens keine Fahrdaten mehr übersenden. Der gesamte Ausbau wird bis zum Ende des Jahres 2017 abgeschlossen.

3.1.28 AP 6000 Rohdatenfilterung, -aufbereitung, -monitoring und –validierung und -auswertung

Das AP 6000 beinhaltet die gesamte Übertragung der aufgenommenen Fahrdaten an einen Server, deren Aufbereitung und Filterung sowie anschließende Auswertung. Dazu wurden Schnittstellen und Algorithmen entwickelt, um den Datenzugriff möglichst effizient zu gestalten und die Plausibilität der erhobenen Felddaten bestmöglich zu gewährleisten.

3.1.29 AP 6100 Monitoring Datenübertragung und Validierung

Das AP 6100 beinhaltet die regelmäßige Überprüfung der Datenverfügbarkeit aus den verschiedenen Erfassungskanälen (CAN-Logger, sensorbasierte Logger, Smartphones) auf dem Server. Darüber hinaus gilt es, eine lückenlose Fehleridentifikation zu gewährleisten sowie etwaigen Datenverlust mit Hilfe von Laufleistungsüberprüfungen zu identifizieren.

3.1.30 AP 6110 Monitoring Datenübertragung und Validierung sensorbasierte Datenlogger und Smartphones

Im Zuge des Arbeitspaketes 6110 stand die regelmäßige Überprüfung der Datenverfügbarkeit der sensorbasierten Datenlogger im Vordergrund. Dieses umfasste die ständige Analyse und Bewertung von auf dem Server eingehenden Fahrdaten. Auf Basis der eingetroffenen Fahrdaten konnten somit beispielsweise defekte Datenlogger-Systeme identifiziert und repariert werden.

Des Weiteren beinhaltete dieses Arbeitspaket die geeignete Aufbereitung der aufgenommenen Fahrdaten, um eine auswertbare Datenbasis zu gewährleisten. Die Tatsache, dass es sich bei den Messungen um teilweise fehlerbehaftete und aufgrund des systembedingten partiellen Ausfalls der satellitengestützten Bewegungserfassung auch lückenhafte Rohdaten handelte, erforderte eine Auswertung in Form eines Software-Backends. Dieses Software-Backend wurde in Gestalt einer MATLAB-Schnittstelle am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen entwickelt und für den Datenzugriff und die Aufbereitung der Daten verwendet. Dadurch fungiert dieses Tool als Schnittstelle zwischen den am Server eintreffenden Rohdaten und der für die anschließende Auswertung benötigten gültigen Fahrdaten (vgl. Abbildung 135).

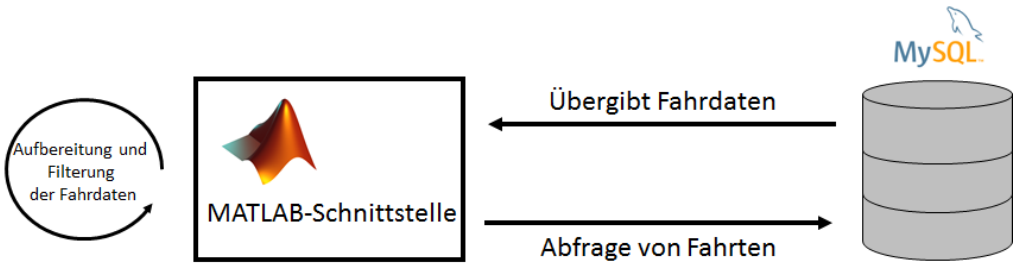


Abbildung 135: Schematische Darstellung der Datenschnittstelle

Die zuvor genannten Rohdaten setzen sich im Wesentlichen aus der in Tabelle 3 in Abschnitt 3.1.2 genannten Inhalte der Datentabelle zusammen. Es existiert somit für jede Datenlogger-ID eine Anzahl an Fahrten, die durch eine Auswertung auf Seiten des Servers identifiziert werden. Zu jeder dieser Fahrten werden wiederum eine Menge an sekündlichen Fahrdatenschrieben zugeordnet, welche den GPS-Datensatz aus Tabelle 76 in Abschnitt 3.1.25 sowie die Messergebnisse der Außentemperatur und des aktuell geladenen bzw. entladenen Stroms der Traktionsbatterie beinhalten. Das Konvolut dieser Daten dokumentiert eine serverseitig identifizierte Fahrt, welche als Eingangsgröße der Software-Schnittstelle dient. Der angesprochene Zusammenhang ist in Abbildung 136 schematisch aufgetragen. Dabei beschreibt der Wortlaut „DS“ einen sekündlichen Datensatz mit nachfolgenden Indexen. Die Gesamtheit aller Datensätze setzt sich zu einer Gesamtfahrt zusammen.

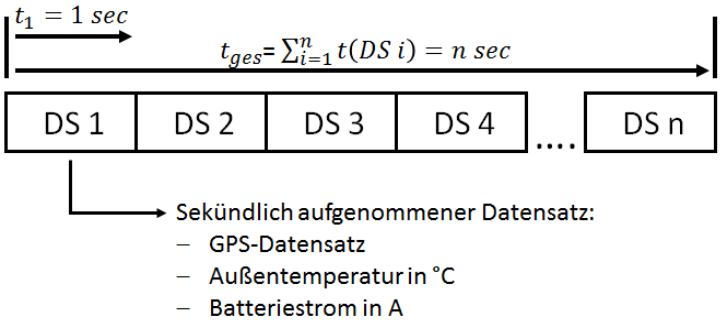


Abbildung 136: Schematische Darstellung einer serverseitig erkannten Fahrt, welche aus Einzeldatensätzen besteht.

Dabei kann es vorkommen, dass ungültige Datensätze, z.B. bedingt durch einen Verlust des GPS-Signals, in der Gesamtheit der Fahrdaten in einer Fahrt enthalten sind. Da die wesentlichen Informationen über das Nutzungsverhalten eines Flottenfahrzeugs, wie z.B. das Geschwindigkeitsprofil oder die Fahrtdistanz, ausschließlich aus diesen GPS-Datensätzen abgeleitet werden kann, müssen diese fehlerbehafteten Daten zunächst ausreichend gefiltert bzw. aufgewertet werden, um die Generierung eines gültigen Fahrdatensatzes zu erlauben. Die Identifizierung dieser ungültigen Fahrdaten wurde durch eine interne Funktion des eingesetzten GPS-Sensors erleichtert, welche eine Klassifizierung der Signalqualität des GPS-Signals vornimmt und diese Bewertung an einen sekündlich eintreffenden GPS-Datensatz anhängt. Anhand dieser Information wurden betroffene Datensätze durch geeignete Interpolation aus gültigen Fahrdaten vor und nach dem Ausfall aufbereitet. War dies in Ausnahmefällen nicht möglich, so wurden die sekündliche Messung verworfen und aus dem Datensatz entfernt. Die Datenbank beinhaltet etwa 275.244.456 GPS-Datensätze von denen 238.800.893 eine ausreichende Signalqualität aufweisen. Demnach existieren 36.443.563 ungültige GPS-Datensätze, was ungefähr 13,2% der aufgenommenen Daten ausmacht.

Neben Signalverlusten wirkte sich die in Abschnitt 3.1.1 erläuterte Messungenauigkeit bzw. Messabweichung des GPS-Sensors auf die Datengüte der Fahrdaten aus. Dadurch können z.B. hohe geografische Distanzen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen entstehen, die physikalisch unkorrekt sind und die Analyse verfälschen würden. Um den Einfluss dieser Fehlerquellen zu unterbinden, wurde eine maximal zulässige Distanz zwischen zwei aufeinanderfolgenden sekündlichen Messungen festgelegt, bei deren Überschreitung eine geeignete Berechnung der realen Strecke über zeitlich davorliegenden und nachfolgenden Fahrdaten durchgeführt wird.

Abseits der Filterung bzw. Aufbereitung der GPS-Bewegungsdaten galt es, die aufgenommenen Messwerte der Außentemperatur und des Batteriestroms mit den zuvor genannten Bewegungsdaten einem einheitlichen Zeitstempel zuzuordnen. Aufgrund der Tatsache, dass der Batteriestrom mit einer Messfrequenz von 10 Hz aufgezeichnet wurde, erhielt jeder sekündliche Fahrdatensatz sowohl den Mittelwert der zehn Messungen, die pro Sekunde stattfanden, als auch einen Vektor, der die exakten Messergebnisse beinhaltete. Der entstandene zeitlich abgeglichene und aus gültigen Fahrdaten bestehende Datensatz

wurde dann mit Informationen aus einer Fahrzeugdatenbank verknüpft. Diese Fahrzeugdatenbank beinhaltet eine Übersicht über die Zuordnung der ausgerüsteten Projektfahrzeuge zu vergebenen Datenlogger-IDs. Somit wurde jedem Fahrdatensatz die exakte Bezeichnung des Fahrzeugs, dessen Fahrzeugtyp und Verwendungsart sowie Kenndaten des Fuhrparks, in dem das Fahrzeug eingesetzt wird, zugeordnet.

In einem letzten Schritt vor der eigentlichen Auswertung der Fahrdaten, auf die in Abschnitt 3.1.32 eingegangen wird, erfolgte eine Analyse der gültigen Fahrten in der Gesamtheit der Fahrdaten, die laut der serverseitigen Auswertung eine Einzelfahrt des Projektfahrzeugs bilden. Grundlage für diesen Auswertungsschritt bildete die Tatsache, dass z.B. lange Standzeiten des Fahrzeugs bei eingeschalteter Zündung serverseitig als eine gültige Fahrt klassifiziert wurden. Dieser Sachverhalt wird durch eine klare Definition für eine gültige Einzelfahrt aufgelöst. Danach gilt ein Satz von Fahrdaten als Einzelfahrt, wenn er eine Distanz von mindestens einem Kilometer sowie eine Dauer von 60 Sekunden aufweist.

Der gesamte Filterungs- bzw. Aufbereitungsprozess ist nachfolgend als Ablaufstruktur schematisch in Abbildung 137 dargestellt.

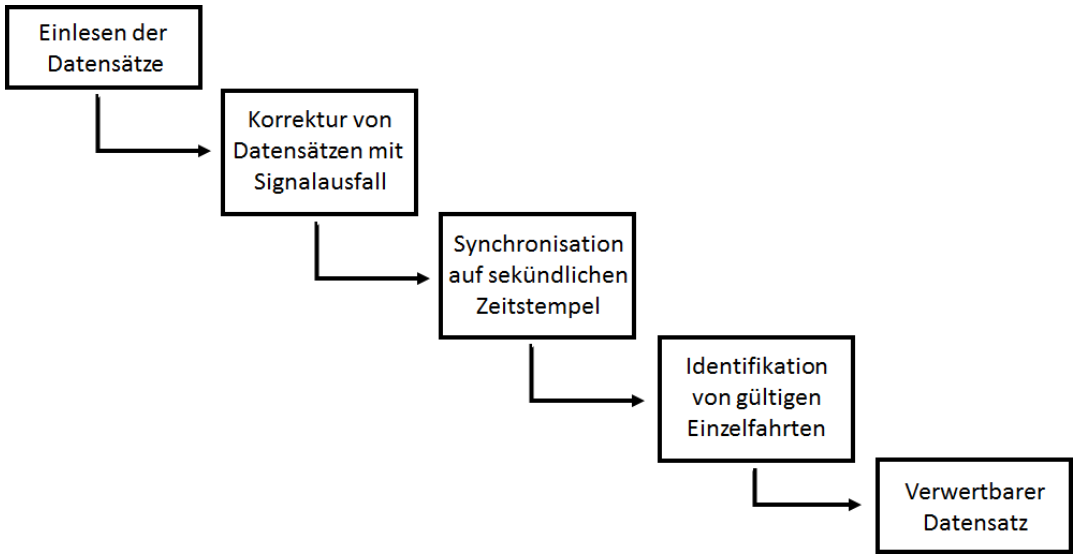


Abbildung 137: Schematischer Ablauf des Filterungs- bzw. Aufbereitungsprozesses

Die Auswertung der Rohdaten nach dem zuvor vorgestellten Algorithmus ergab eine Datenbasis von zunächst 61.225 Einzelfahrten mit ca. 355.541 Kilometern Gesamtdistanz, die im Projektzeitraum bis Ende April 2017 stattgefunden haben. Dieser Zeitpunkt wurde intern am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen als Deadline für die Festmachung der Datengrundlage für spätere Auswertungen festgelegt.

Die systembedingt auch länger andauernden möglichen GPS-Signalverluste, wie sie z.B. in Tunneln oder Strecken ohne ausreichendes GPS-Signal auftreten können, verursachen Abweichungen zwischen den identifizierten Einzelfahrten und den real stattgefundenen Fahrten. So besteht die Möglichkeit, dass bei Verlust des GPS-Signals eine zusammenhängende Fahrt in zwei nach Definition gültige Einzelfahrten

aufgeteilt wurde. Zusätzlich können Zeiträume mit fehlenden GPS-Messungen in den ausgegebenen identifizierten Fahrten auftreten. Auch ein fehlendes GPS-Signal zu Beginn einer Fahrt wirkt sich auf die Datengüte aus, da dadurch Diskrepanzen zwischen der zurückliegenden Halteposition des Fahrzeugs und der Startkoordinaten der neu angetretenen Fahrt entstanden sind und folglich das Fahrzeug einen geografischen Sprung zurückgelegt hat. Diese Problematik ist nachfolgend in Abbildung 138 anhand einer Beispielfahrt aus der Gesamtheit der Fahrten, die während des Forschungsprojektes aufgenommen sind, verdeutlicht.

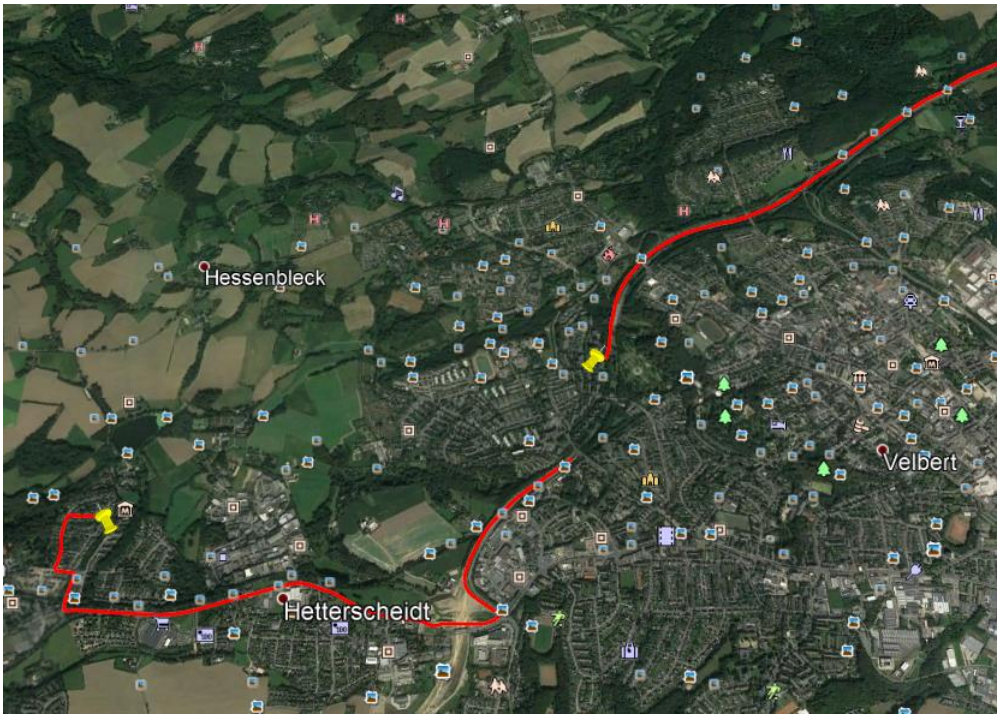


Abbildung 138: Signalausfall während einer aufgezeichneten Fahrt

In dieser Fahrt tritt ein GPS-Signalverlust auf, so dass die real zusammenhängende Fahrt fälschlicherweise in zwei Teilstrecken unterteilt wird. Bedingt durch die Tatsache, dass beide Teilstrecken für sich genommen eine nach der getroffenen Definition gültige Einzelfahrt abbilden, entstehen durch den Verlust des Signals zwei augenscheinlich korrekte Einzelfahrten. Dieser Fehler wirkt sich hinsichtlich der Bewertung des Nutzungsverhaltens der Fahrzeuge z.B. auf die Bestimmung der täglichen Anzahl an Fahrten und der Einzelfahrt- bzw. Tagesfahrleistung aus. Somit kann das reale Fahrverhalten der Projekteilnehmer verfälscht werden und zusätzlich Datenverlust auftreten. Um diese Datenverluste zu vermeiden, wurde ein weiterer Auswertealgorithmus entwickelt, der die Gesamtheit der Einzelfahrten nach möglichen Signalverlusten analysiert und gegebenenfalls zusammenhängende Fahrten rekonstruiert. Dabei muss unterschieden werden zwischen Einzelfahrten, die in der Realität wirklich getrennt und nacheinander angetreten wurden, und zusammenhängenden Fahrtabschnitten, die bedingt durch einen Signalverlust des

GPS aufgeteilt wurden. Des Weiteren muss der Signalausfall auf einer kompletten Einzelfahrt und folglich das Fehlen dieser Fahrt in der Fahrtenhistorie eines Fahrzeugs behandelt werden. In diesem Fall kann lediglich der Zeitrahmen, in der die Fahrt stattgefunden haben muss, sowie die direkte Distanz zwischen dem Endpunkt der letzten und dem Startpunkt der nächsten mitgeschriebenen Fahrt rekonstruiert werden. Die verloren gegangene Fahrstrecke wird über die Luftlinie (orthodromische Distanz d_{orth}) zwischen beiden GPS-Punkten mittels des in (3-33 **)** dargestellten formelmäßigen Zusammenhangs berechnet.[77] Hierbei wird die Erdoberfläche idealisiert als kugelförmig angenommen.

$$d_{orth} = 111{,}12\ km * \arccos(\sin\varphi_A * sin\varphi_B + cos\varphi_A * cos\varphi_B * \cos(\lambda_B - \lambda_A)) \qquad (3\text{-}33\ )$$

In (3-33 **)** beschreiben die Variablen φ und λ den jeweiligen Breiten- und Längengraden. Da zur Berechnung der Fahrdistanz zwischen zwei GPS-Punkten die direkte Luftlinie herangezogen wird, entspricht der ermittelte räumliche Versatz der Mindestfahrstrecke der künstlich generierten Fahrt und damit einer Abschätzung nach unten.

Um aus der Gesamtheit der teilweise in mehrere aufgeteilten Einzelfahrten eines Fahrzeugs die realen Fahrten bestmöglich darzustellen, wird ein Algorithmus eingesetzt, der die zeitlich aufsteigend sortierten Einzelfahrten nacheinander analysiert und zueinander in Verhältnis setzt. Dazu werden die Bewertungskriterien der räumlichen Distanz zwischen dem Ende der zurückliegenden und dem Startpunkt der aktuellen Einzelfahrt sowie der zeitliche Versatz zwischen diesen Fahrten betrachtet. Aus der Luftlinie und der Zeitdifferenz zwischen beiden GPS-Punkten kann die mittlere Geschwindigkeit bestimmt werden, mit der die Distanz in der vorliegenden Zeitdifferenz zurücklegbar gewesen wäre. Weist diese mittlere Geschwindigkeit Werte kleiner als 10 km/h auf, so kann davon ausgegangen werden, dass im bestimmten Zeitfenster eine weitere Einzelfahrt stattgefunden hat, die nicht vom Datenlogger aufgezeichnet wurde und deren Gesamtlänge mindestens die zuvor bestimmte Distanz beträgt.

Da kurzzeitiger GPS-Signalverlust z.B. zu Beginn einer Fahrt nicht unüblich ist, wird eine räumliche Toleranz von 3 Kilometern festgelegt, um kurzzeitige Diskrepanzen zwischen zwei Einzelfahrten abzufangen. Dies dient dazu, einen Vertrauensbereich zu definieren, bei dessen Überschreitung nach nicht aufgezeichneten Einzelfahrten gesucht wird. Alle Differenzen zwischen zwei Einzelfahrten, die diesen Schwellenwert unterschreiten werden ausschließlich nach der Zeit, die zwischen dem Ende der zurückliegenden Einzelfahrt und dem Beginn der aktuellen Einzelfahrt vergangen ist, analysiert. Existiert ein zeitlicher Unterschied von weniger als 5 Minuten, so wird davon ausgegangen, dass beide Einzelfahrten in der Realität eine zusammenhängende Fahrt abbilden und folglich zu einer Gesamtfahrt zusammengesetzt werden müssen. Die Quantifizierung der zuvor genannten Parameter entstammt einer Bewertung der Aufbereitungsergebnisse bei unterschiedlichen Koeffizienten. Dabei zeigte sich, dass eine Veränderung der

[77] Vgl. Venghaus (2017), S. 21

Schwellwerte nur eine geringe relative Abweichung der Resultate von maximal 5% bei der Fahrtanzahl und maximal 4% bei der Fahrtdistanz zur Folge hatte.

Bei Annahme der aufgezeigten Parameter zeigte sich dabei das beste Aufbereitungsergebnis.

Der gesamte Ablauf des beschriebenen Algorithmus ist in Abbildung 139 dargestellt.

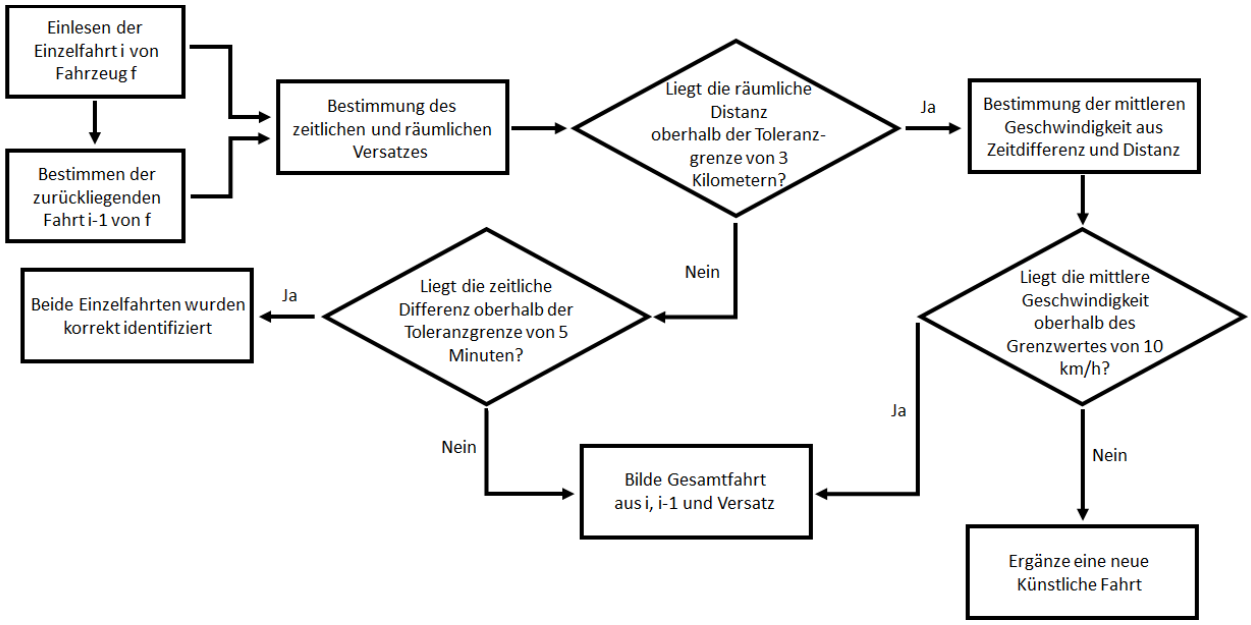


Abbildung 139: Ablaufplan des Algorithmus zur Erkennung von zusammenhängenden Fahrten

Nach Anwendung dieses Algorithmus auf die Gesamtheit der Fahrten jedes Projektfahrzeugs reduzierte sich die Datenbasis von 61.225 auf 52.973 Einzelfahrten. Die ursprüngliche Gesamtfahrleistung von 355.541 Kilometern wurde auf 471.967 Kilometer um ca. 33% gesteigert. Daraus geht hervor, dass die Summe an realen Gesamtfahrten mit längeren Fahrdistanzen, die in mehrere Einzelfahrten mit geringer Fahrdistanz zerrissen worden sind, deutlich zugenommen hat. Ebenso wurden zahlreiche Fahrten, die z.B. durch langwierigen Signalausfall nicht vermessen worden sind, durch die Angabe eines Zeitfensters sowie Mindestdistanz rekonstruiert.

So ergibt sich auch für die in Abbildung 138 dargestellte Fahrt eine zusammenhängende Gesamtfahrt, wie Abbildung 140 zeigt.

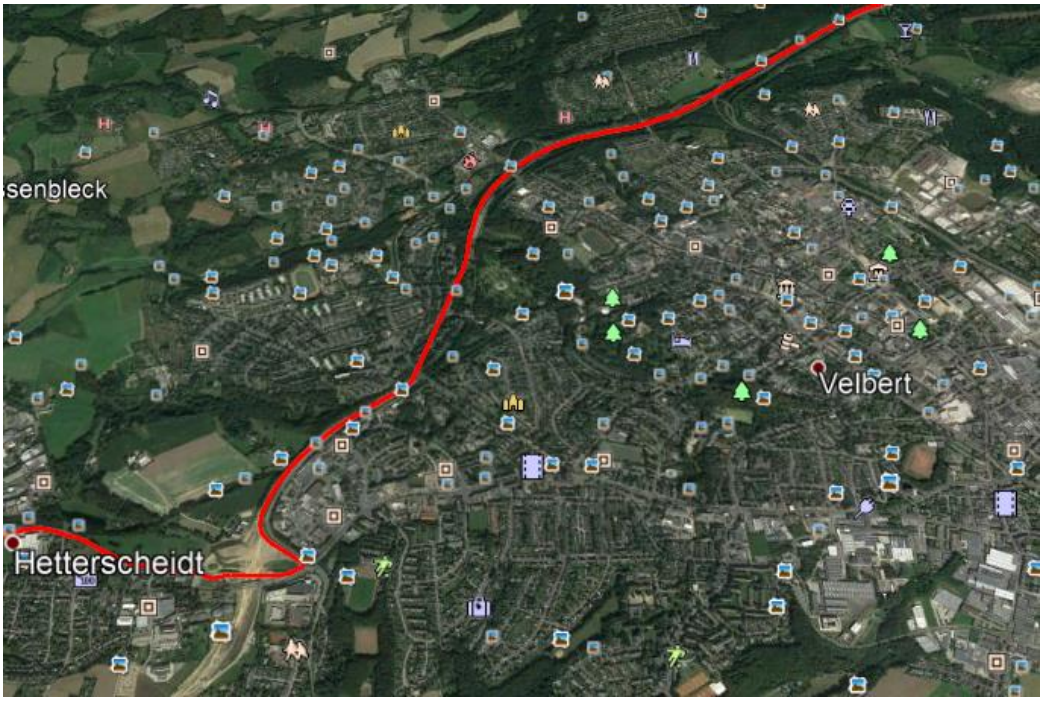


Abbildung 140: Zusammengesetzte Gesamtfahrt aus zwei Einzelfahrten

Zu diesen synthetisch rekonstruierten Fahrten können jedoch systembedingt keine Aussagen über das tatsächliche Fahrverhalten hinsichtlich des Geschwindigkeitsprofils oder des realen Energiebedarfs getroffen werden. Allerdings können anhand der aufbereiteten Fahrdaten Aussagen über das annähernd reale Nutzungsverhalten der Projektfahrzeuge hinsichtlich Fahrleistungen und Nutzungshäufigkeit im Flottenkontext formuliert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die rekonstruierten Fahrdistanzen die Mindestdistanz beschreiben und dementsprechend die wirklichen Fahrleistungen noch etwas oberhalb dieser Berechnungen liegen muss.

Um Prognosen hinsichtlich des realen Energiebedarfs der Elektrofahrzeuge zu erhalten, können die Messergebnisse des geladenen bzw. entnommenen Batteriestroms mit den gültigen GPS-Datensätzen der aus den Rohdaten identifizierten Einzelfahrten betrachtet werden. Daraus lässt sich der durchschnittliche Energiebedarf bei realem Fahrverhalten in Ah pro 100 km hochrechnen, so dass Analysen, wie die Bestimmung des Energiebedarfs unter realen Bedingungen, möglich sind. Dementsprechend beziehen sich die nachfolgenden Auswertungen, die das Nutzungsverhalten beleuchten, auf die aufbereitete Datenbasis von 52.973 Einzelfahrten. Alle übrigen Analysen werden anhand der vermessenen Bewegungsdaten, die mit dem Algorithmus aus Abbildung 137 erzeugt worden sind, durchgeführt.

3.1.31 AP 6200 Entwicklung und Durchführung Rohdatenfilterung und -konvertierung

Das AP 6200 dient dem Zweck, die aufgezeichneten Rohdaten in eine Form zu bringen, die sinnvolle und effiziente Analysen erlaubt. Hierzu müssen Fehler behoben bzw. behandelt, Signalstrukturen synchronisiert und vereinheitlicht sowie die Daten der Analyse zugänglich gemacht werden.

3.1.32 AP 6210 Entwicklung und Durchführung Rohdatenfilterung und -konvertierung sensorbasierte Datenlogger und Smartphones

Die angestrebte Analyse bzw. Auswertung der in Abschnitt 3.1.30 aufgeführten aufbereiteten Rohdaten erfordert eine geeignete Konvertierung der Gesamtheit aller Einzelfahrten in eine einheitliche Dateistruktur. Zu diesem Zweck orientierte sich die Dateistruktur an derer des Minimaldatensatzes des „Schaufenster Elektromobilität“.[78] Der Minimaldatensatz basiert auf dem Anspruch, eine übersichtliche Gesamtauswertung der jeweiligen Fahrten anzugeben und Forschungsergebnisse projektunabhängig vergleichbar zu machen. Anhand des Minimaldatensatzes können somit unterschiedliche Analysen zeiteffizient und strukturiert durchgeführt werden. Als Kennwerte für eine Beschreibung einer Fahrt durch Minimaldaten wurden dabei die in Tabelle 77 enthaltenen Kriterien festgelegt. Dabei können alle charakteristischen Kenngrößen aus den aufgenommenen Fahrdaten einer Einzelfahrt bestimmt werden.

Wie in Abschnitt 3.1.30 erläutert, kann die Bewertung des realen Nutzungsverhaltens ausschließlich auf Basis der erneut aufbereiteten Fahrdaten stattfinden. Eine Betrachtung der aus den Rohdaten identifizierten Einzelfahrten ohne weitere Korrektur würde das tatsächliche Nutzerverhalten hinsichtlich der Häufigkeit und Länge von Einzelfahrten und der damit verbundenen Tagesfahrleistung der Fahrzeuge verfälschen.

Die übrigen Analysen, wie z.B. eine Betrachtung des Ladungsbedarfs über der Fahrtdistanz und Außentemperatur, finden auf Grundlage der aufgenommenen Messdaten statt.

Dementsprechend werden beide Datenscharen in die Form des in Tabelle 77 beschriebenen Minimaldatensatzes gebracht, um die jeweilige Auswertung strukturiert vollziehen zu können. Dabei besitzen die Minimaldatensätze beider Datenscharen unterschiedliche Vertrauensbereiche. Während die erneut aufbereiteten Fahrten gegenüber den aus den Rohdaten identifizierten Fahrten eine höhere Genauigkeit hinsichtlich ihrer Fahrleistung und Fahrtenhäufigkeit aufweisen, weichen sie im Kontext von z.B. energetischen Betrachtungen ab. Aufgrund von Fahranteilen, denen kein Messwert zugeordnet werden kann, ergibt sich eine Diskrepanz zwischen der entnommenen und geladenen Batterieladung und der zurückgelegten Fahrdistanz, so dass der Energiebedarf in diesem Fall beschönigt werden würde. Diesen Zusammenhang können die aus den Rohdaten identifizierten Einzelfahrten jedoch wiederum auf Grundlage

[78] Vgl. Schaufenster Elektromobilität (2017), S. 28 ff.

ihrer Messergebnisse abbilden. Folglich kann der erzeugte Minimaldatensatz der aufbereiteten Einzelfahrten zur Bestimmung des Nutzungsverhaltens und der generierte Minimaldatensatz aus den identifizierten Einzelfahrten zur Analyse von physikalischen Zusammenhängen und Fahrverhalten verwendet werden.

Tabelle 77: Kriterien des sogenannten Minimaldatensatzes zur Charakterisierung einer Fahrt.

Kriterium	**Beschreibung**
Logger-ID	Interne Identifikationsnummer des verbauten Datenloggers/Fahrzeug
Fahrt-Nr.	Identifikationsnummer der Fahrt des Fahrzeugs
Fahrzeugmodell	Modellname des Fahrzeugs, z.B. BMW i3
Fahrzeugtyp	Modelltyp des Fahrzeugs, z.B. BEV
Unternehmen	Zuordnung des Unternehmensnamens zum Fahrzeug
Unternehmensart	Beschreibung der Unternehmensart, z.B. Kleinunternehmen
Branche	Branche, in der das Unternehmen tätig ist
Fuhrparkgröße	Beschreibung der Fuhrparkgröße, z.B. 1-9 Fhzg.
Nutzungsart	Nutzungsart des Fhzg., z.B. Poolfahrzeug
Startdatum [TT.MM.JJJJ]	Startdatum der angetretenen Fahrt
Startzeit nach UTC [hh:mm:ss]	Startzeit der angetretenen Fahrt in UTC
Wochentag Start	Wochentag, an dem die Fahrt begonnen wurde
Startkoordinaten [Breitengrad, Längengrad]	GPS-Koordinaten des Startpunktes der Fahrt
Enddatum [TT.MM.JJJJ]	Enddatum der angetretenen Fahrt
Endzeit nach UTC [hh:mm:ss]	Endzeit der angetretenen Fahrt in UTC
Wochentag Ende	Wochentag, an dem die Fahrt beendet wurde
Endkoordinaten [Breitengrad, Längengrad]	GPS-Koordinaten des Endpunktes der Fahrt
Fahrtdauer [s]	Gesamte Fahrtdauer in Sekunden
Fahrtdistanz [km]	Gesamte Fahrtdistanz in Kilometern
Positiv gefahrene Höhenmeter GPS [m]	Summierte positiv gefahrene Höhenmeter
Negativ gefahrene Höhenmeter GPS [m]	Summierte negativ gefahrene Höhenmeter
Anzahl Stopps [Stk.]	Anzahl der Halte während der Fahrt

0-3 km/h [hh:mm:ss]	Fahrzeit in Sekunden, in der die Geschwindigkeit zwischen 0 und 3 km/h liegt
3-30 km/h [hh:mm:ss]	Fahrtzeit in Sekunden, in der die Geschwindigkeit zwischen 3 und 30 km/h liegt
30-60 km/h [hh:mm:ss]	Fahrtzeit in Sekunden, in der die Geschwindigkeit zwischen 30 und 60 km/h liegt
60-90 km/h [hh:mm:ss]	Fahrtzeit in Sekunden, in der die Geschwindigkeit zwischen 60 und 90 km/h liegt
90-120 km/h [hh:mm:ss]	Fahrtzeit in Sekunden, in der die Geschwindigkeit zwischen 90 und 120 km/h liegt
> 120 km/h [hh:mm:ss]	Fahrtzeit in Sekunden, in der die Geschwindigkeit über 120 km/h liegt
Maximal Geschwindigkeit [km/h]	Höchste Geschwindigkeit, die während der Fahrt erreicht wurde
Minimale Außentemperatur [Grad Celsius]	Geringste Außentemperatur, die während der Fahrt gemessen wurde
Maximale Außentemperatur [Grad Celsius]	Höchste Außentemperatur, die während der Fahrt gemessen wurde
Entnommene Batterieladung [Ah]	Zeitlich aufintegrierter Batteriestrom, der aus der Traktionsbatterie entnommen wurde
Geladene Batterieladung [Ah]	Zeitlich aufintegrierter Batteriestrom, der in die Traktionsbatterie eingespeist wurde

Die Betrachtung von physikalischen Abhängigkeiten bzw. Zusammenhängen erfordert die weitere Verarbeitung der aufgenommenen Rohdaten, so dass z.B. Informationen wie die geladene und entnommene Batterieenergie vorliegen.

Für die Berechnung der entnommenen bzw. geladenen Batterieladung in Ah werden die zehntelsekündlich gemessenen Batterieströme zunächst nach ihrer Flussrichtung, also ihrem mathematischen Vorzeichen, getrennt. Ein negativer Wert des Batteriestroms markiert dabei die Entladung der Batterie, während die positive Wertigkeit des Batteriestroms die Ladung der Batterie beschreibt. Die Bestimmung der Gesamtladung, die während einer Fahrt geladen oder entladen wurde, erfolgt durch die zeitliche Integration des Batteriestroms mittels des mathematischen Zusammenhangs in (3-34).

$$I_{Batterie} > 0,\ Q_{Batterie,geladen} = \int_0^{t_{ges}} I_{Batterie}\, dt$$
$$I_{Batterie} < 0,\ Q_{Batterie,entladen} = \int_0^{t_{ges}} I_{Batterie}\, dt \quad (3\text{-}35)$$

Um die Charakterisierung der Fahrt hinsichtlich des gefahrenen Geschwindigkeitsbereichs zu ermöglichen, werden die sekündlichen Geschwindigkeitsangaben aus den GPS-Messungen in unterschiedliche Geschwindigkeitsintervalle aufgeteilt. Diese erstrecken sich von 0-3 km/h über 3-30 km/h, 30-60 km/h, 60-90 km/h, 90-120 km/h bis zu über 120 km/h. Dazu wird die Gesamtzeit, in der sich das Fahrzeug in einem dieser Geschwindigkeitsintervalle aufgehalten hat, bestimmt. Somit kann die Dynamik einer Fahrt durch Analyse der zeitlichen Verteilung auf die unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereiche abgeschätzt werden. Die Angabe über die minimal bzw. maximal vorliegende Außentemperatur während einer Fahrt erlaubt im Zusammenschluss mit dem effektiven Ladungsbedarf, der zur Durchführung der Fahrt erforderlich war, geeignete Aussage über den temperaturabhängigen Ladungsbedarf der Flottenfahrzeuge. Der Gesamtladungsbedarf einer Fahrt lässt sich aus der Differenz von geladener und entladener Batterieladung bestimmen.

$$Q_{Batterie,gesamt} = Q_{Batterie,entladen} + Q_{Batterie,geladen} \quad (3\text{-}36)$$

Im Folgenden wird die Auswertung der aufbereiteten Fahrdaten hinsichtlich des Nutzungsverhaltens der Projektteilnehmer dargeboten.

Im Zeitraum von Anfang Februar 2015 bis Ende April 2017 wurden 196 Fahrzeuge (71 BEV, 124 REX, 1 PHEV) vermessen. Diese Fahrzeuge wurden als Fuhrparkfahrzeuge bzw. Dienstwagen in den im Abschnitt 3.1.23 aufgezeigten Unternehmen eingesetzt. Sie lieferten bis zum Stichtag 30.04.2017 folgende Datenbasis:

- Gesamtanzahl an Fahrten: 52.973,
- Gesamtfahrstrecke: 471.967 km,
- Gesamtfahrzeit: 10.324 h.

Diese Kennwerte beschreiben die Gesamtdatenbasis, die durch alle Projektfahrzeuge im oben genannten Vermessungszeitraum erhoben wurde. Die angegebenen Daten entstammen der Einzelfahrten, die durch den in Abbildung 139 präsentierten Algorithmus aufbereitet worden sind.

Der Großteil der aufgezeichneten Fahrten fand, wie die Heatmap in Abbildung 141 verdeutlicht, in Metropolregionen wie z.B. Stuttgart bzw. Ballungsräumen wie dem Ruhrgebiet statt. Die eingezeichneten Punkte beschreiben die Häufigkeit von Startpunkten einer Fahrt in einem Gebiet.

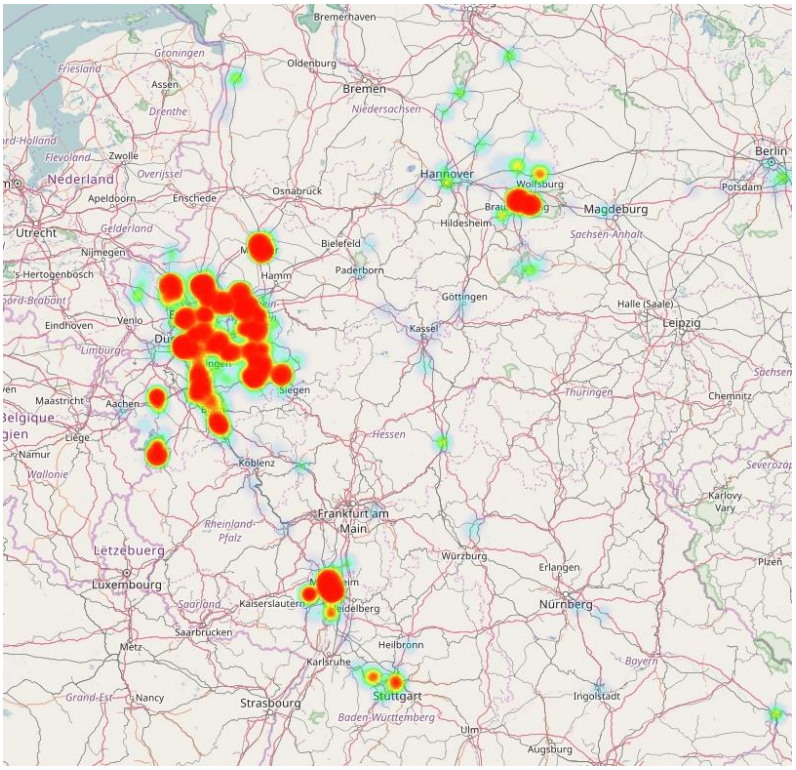


Abbildung 141: Häufigkeitsverteilung von Fahrtbeginnen in Darstellung einer Heatmap

Eine genaue Unterteilung hinsichtlich des Nutzungsverhaltens an unterschiedlichen Wochentagen sowie der Einzel- und Tagesfahrleistung wird nachfolgend diskutiert (vgl. Tabelle 78 und Tabelle 79). Dazu wird zunächst in Tabelle 78 die numerische Verteilung der Fahrleistungen auf die zuvor angedeuteten Wochentage präsentiert. Die Kilometerleistungen werden zu darstellungszwecken auf ganze Kilometer gerundet.

Tabelle 78: Verteilung der Gesamtfahrleistung auf die Wochentage

Wochentag	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag
Anzahl Fahrten	8.759	9.982	10.275	10.201	8.427	3.239	2.090
Strecke in km	71.208	88.008	90.395	91.797	72.294	34.723	23.542
Dauer in h	1.558	1.951	1.999	1.924	1.578	769	545

Tabelle 79: Verteilung der Gesamtfahrleistung Wochentage bzw. Wochenende

	Wochentage	Wochenende
Anzahl Fahrten	47.644	5.329
Strecke in km	413.702	58.265
Dauer in h	9.010	1.314

Die wöchentliche Verteilung der Gesamtfahrleistung zeigt dabei eine eindeutige Tendenz der Nutzung der Flottenfahrzeuge an Werktagen. Dies unterstreicht in erster Linie den schwerpunktmäßigen Einsatz als gewerbliches Fahrzeug. An dem Übergang von Freitag auf Samstag lässt sich erkennen, dass die Anzahl an Fahrten um mehr als 60% einbricht. Dies lässt sich einerseits mit dem Einsatzort der Fahrzeuge erklären. Es ist zu berücksichtigen, dass die Fahrzeuge, wie bereits erwähnt, sowohl als Poolfahrzeuge in einem Fuhrpark als auch als Dienstwagen eingesetzt werden. Wie aus Abschnitt 3.1.23 hervorgeht, wurden 27 Projektfahrzeuge als Dienstwagen verwendet, was einer prozentualen Verteilung von ca. 13,8% entspricht. Bei den übrigen 86,2% der vermessenen Fahrzeuge, die als Fuhrparkfahrzeuge genutzt wurden, kann nicht eindeutig davon ausgegangen werden, dass eine Nutzung der Fahrzeuge über die gewerbliche Tätigkeit an Werktagen hinaus gestattet ist. Folglich könnten diese Fahrzeuge nicht am Wochenende bewegt werden. So ergab eine Auswertung des Gesamtfahrdatensatz, dass 82 der 196 vermessenen Projektfahrzeuge nie an einem Wochenendtag gefahren worden sind. Dies entspricht einem Anteil von ca. 41,8% der Gesamtfahrzeuge. Von diesen 82 Fahrzeugen wurden lediglich 2 als Dienstwagen eingesetzt, so dass etwa 47,3% der Poolfahrzeuge ausschließlich an Werktagen genutzt werden. Dagegen gab es kein Fahrzeug, das ausschließlich an einem Wochenende bewegt worden ist.

Eine andere Erklärung kann zum einen durch mangelndes privates Interesse an der neuen Antriebstechnologie oder aber durch das Fehlen einer geeigneten Ladeinfrastruktur im privaten Lebensumfeld formuliert werden. Gegebenenfalls besitzen interessierte Fuhrparknutzer keinen eigenen Stellplatz inklusive Lademöglichkeit durch z.B. eine Schuko-Steckdose, um die Reichweite des Fahrzeugs wiederherzustellen und entscheiden sich deshalb bewusst gegen eine Leihe bzw. den Einsatz der Elektrofahrzeuge am Wochenende. Ebenfalls können anfallende Stromkosten interessierte Nutzer abschrecken.

Die zuvor auf Grundlage der numerischen Angaben aus Tabelle 78 formulierte Analyse wird auch durch die visuelle Darstellung der jeweiligen Kriterien in Form eines Balkendiagramms deutlich (vgl. Abbildung 142, Abbildung 143, Abbildung 144).

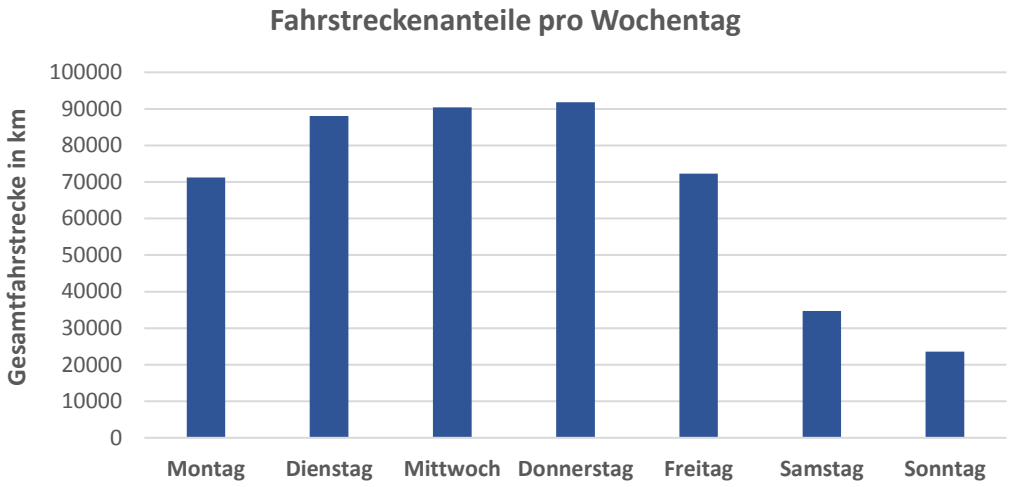


Abbildung 142: Verteilung der Fahrstreckenanteile aller Fahrzeuge auf die Wochentage

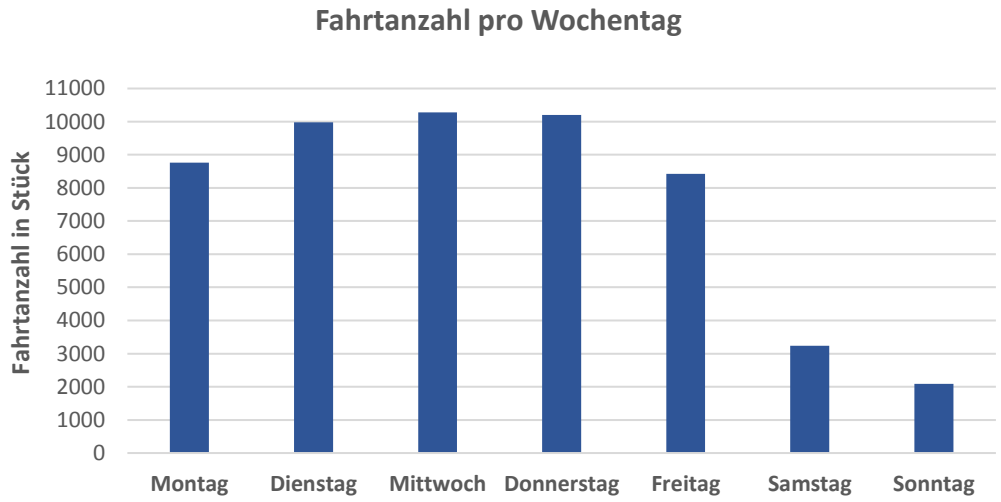


Abbildung 143: Verteilung der Fahrtanzahlen aller Fahrzeuge auf die Wochentage

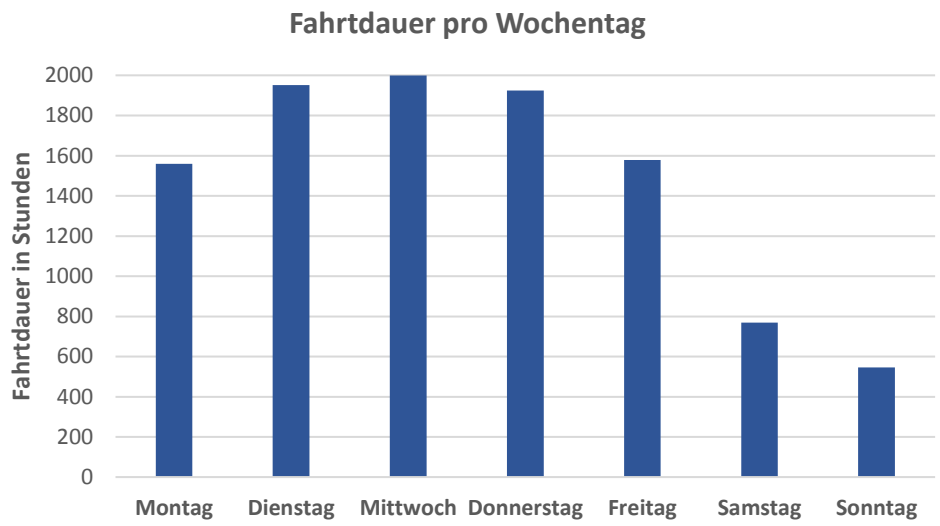


Abbildung 144: Verteilung der Fahrtdauer aller Fahrzeuge auf die Wochentage

Aus der zusammenhängenden Betrachtung der Balkendiagramme in Abbildung 142 bis Abbildung 144 kann jedoch auch ein Trend zu einem potentiell höheren Verhältnis zwischen der Gesamtstrecke in Kilometern und der Anzahl der Fahrten am Wochenende beobachtet werden. Dieses relative Verhältnis ist in Abbildung 145 dargestellt.

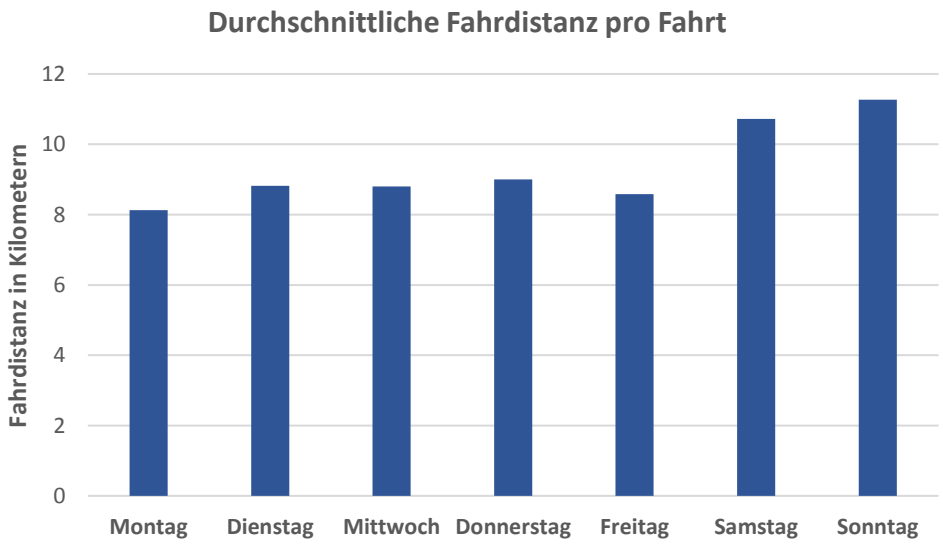


Abbildung 145: Durchschnittliche Fahrdistanz aller Fahrzeuge pro Fahrt

Die Fahrzeuge werden zwar deutlich weniger häufig in Form von Einzelfahrten am Wochenende genutzt, dafür aber tendenziell für höhere Strecken pro Einzelfahrt. Daraus lässt sich ableiten, dass die Projektteilnehmer aus dem Flottenumfeld, die einen Einsatz eines Elektrofahrzeugs am Wochenende planen, mit der gegebenen Reichweite ihr gewohntes Mobilitätsverhalten ausreichend abdecken können. Besonders die Tatsache, dass annähernd alle Dienstwagenfahrer ihr Elektroauto auch in der Freizeit bewegen, lässt

darauf schließen, dass sie sich mit der neuen Antriebstechnologie vertraut gemacht haben und diese auch in ihrem Alltag anwenden können.

Außer an der Verteilung der Gesamtnutzung auf die Wochentage wird das charakteristische Fahrverhalten der Projektteilnehmer maßgeblich durch die Länge der Einzelfahrten bzw. die Tagesfahrleistung definiert. Daraus resultieren beispielsweise Einschätzungen, ob Phänomene, wie z.B. die Reichweitenangst, eingetreten sind. Ebenfalls können Prognosen über Richtwerte für eine ausreichend hohe Reichweite der Traktionsbatterie getroffen werden. Nachfolgend ist die aggregierte Häufigkeit von Einzelfahrten in unterschiedlichen Streckenlängenintervallen in Abbildung 146 aufgezeigt. Bei dieser Darstellung werden alle im Projekt vermessenen Fahrzeuge als eine Gesamtflotte angenommen. Dabei wird die Verteilung nach den Antriebstopologien BEV für batterieelektrisches Fahrzeug, REX für ein batterieelektrisches Fahrzeug mit Range Extender sowie PHEV für Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge unterteilt. Alle Antriebstopologien in Summe ergeben dementsprechend den relativen Gesamtanteil der Gesamtflotte im jeweiligen Streckenbereich. Diese Angabe ist ebenso in der Abbildung aufgetragen.

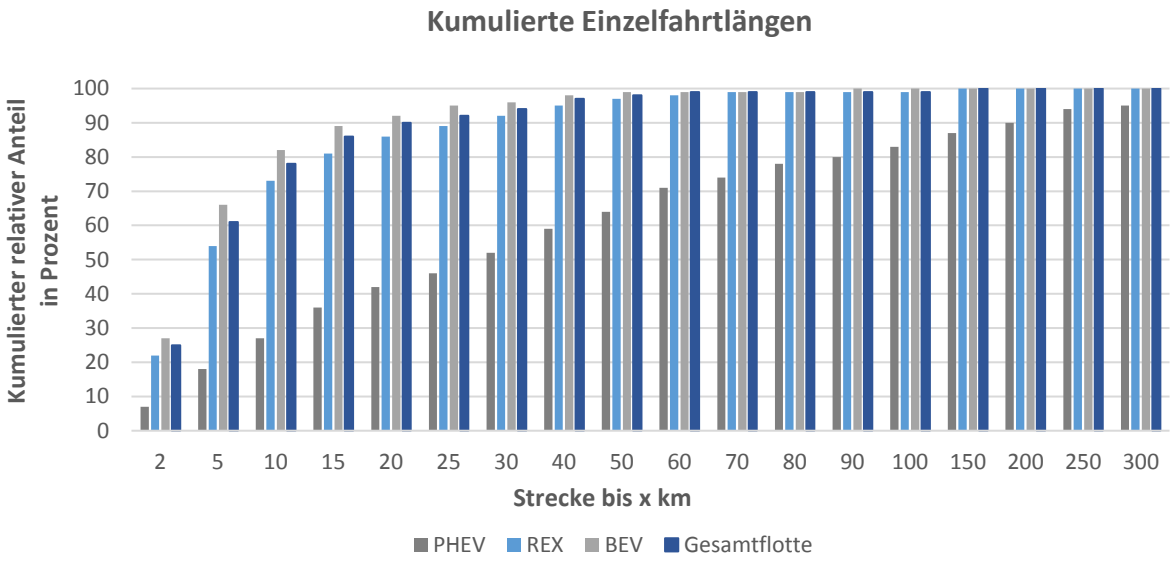


Abbildung 146: Kumulierte Verteilung der Einzelfahrtlängen

Aus dem direkten Vergleich der Fahrzeugtypen folgt, dass der im Forschungsprojekt vermessene Plug-In-Hybrid deutlich längere Einzelfahrstrecken zurücklegt als die batterieelektrischen Fahrzeuge mit und ohne Range Extender. Dies ist im Wesentlichen auf seine Antriebstopologie eines kombinierten Hybrids zurückzuführen. Diese beinhaltet neben einem Elektromotor einen Verbrennungsmotor, dessen Drehmoment als Antriebsmoment direkt auf die Räder übertragen wird. Dementsprechend muss streng zwischen einem konventionellen und einem hybriden bzw. rein elektrischen Betrieb des PHEV unterschieden werden, um einen sinnvollen Vergleich mit dem BEV und REX zu gewährleisten. Da dieser Sachverhalt nicht eindeutig aufgelöst werden kann und die Datenbasis im Bereich Plug-In-Hybride lediglich auf ein Fahrzeug gestützt und folglich nicht repräsentativ ist, wird der PHEV in der weiteren Auswertung nicht näher

behandelt. Vielmehr wird auf die Analyse des Fahrverhaltens der batterieelektrischen Fahrzeuge mit und ohne Range Extender eingegangen.

Bei der Analyse der Einzelfahrleistungen der zuvor genannten Fahrzeugtypen zeigt sich, dass beide Fahrzeugtypen zu mehr als 50% für Kurzstrecken von bis zu 5 Kilometern eingesetzt werden. Aus der Steigung der aufsummierten relativen Anteile der Einzelfahrtanteile lässt sich schließen, dass die Fahrzeuge vorrangig für Kurzstrecken bis ca. 15 Kilometer verwendet werden. Nach diesem Schwellwert existieren in den nachfolgenden Streckenintervallen nur noch vergleichsweise geringfügige Änderungen des prozentualen Anteils. Ebenso auffällig ist, dass batterieelektrische Fahrzeuge, die mit einem Range Extender ausgestattet sind, im Verhältnis zu rein batterieelektrischen Fahrzeugen längere Einzelfahrstrecken zurücklegen. So erstrecken sich 92% der Einzelfahrten, die mit einem BEV unternommen worden sind, bis zu einer Fahrstrecke von 20 Kilometern. REX-Fahrzeuge legen diese Fahrstrecke in 86% der Fahrten zurück. Der relative Anteil von 90% der Einzelfahrten wird bei Fahrzeugen mit Range-Extender erst bei einer Fahrdistanz von 30 Kilometern erreicht.

Deutlicher wird die unterschiedlich intensive Nutzung der beiden Fahrzeugtypen bei der Darstellung der Tagesfahrstrecke in Abbildung 147. In dieser werden die jeweiligen Einzelstrecken eines Fahrzeugs pro Tag zu einer gesamten Fahrleistung aufsummiert.

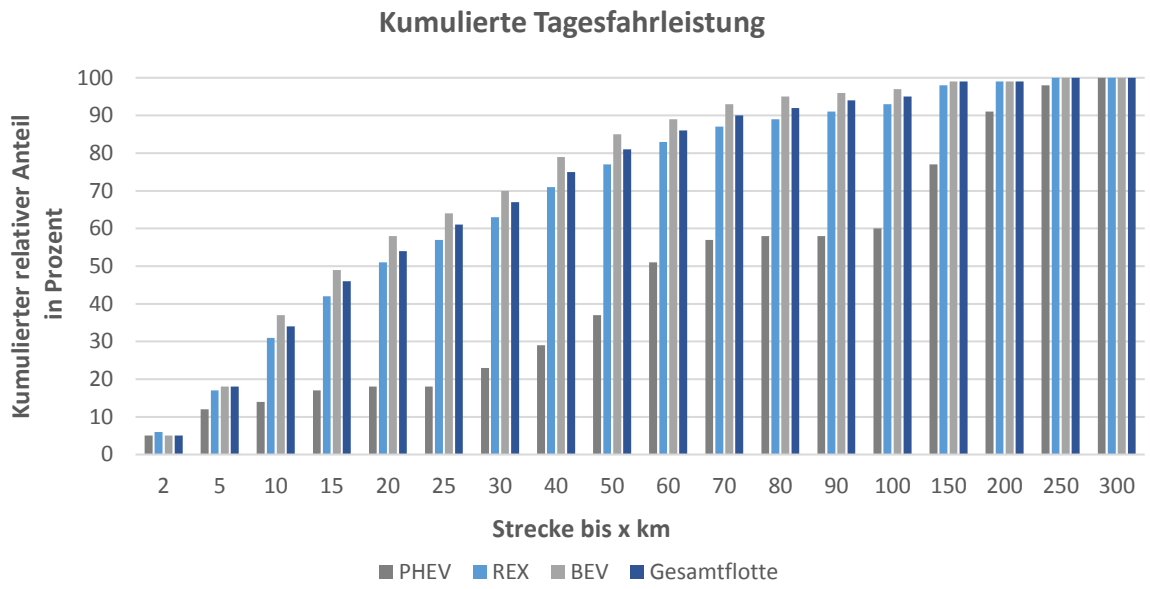


Abbildung 147: Kumulierte Verteilung der Tagesfahrleistungen

Während der relative Anteil der BEV- und REX-Fahrzeuge bis zu Tagesfahrleistungen von 5 Kilometern als annähernd identisch angesehen werden kann, liegt der Anteil der batterieelektrischen Fahrzeuge bei den weiteren Tagesfahrleistungen oberhalb derer der REX-Fahrzeuge. Daraus folgt, dass die Fahrzeuge ohne Range Extender geringere Fahrdistanzen pro Tag zurücklegen als die Fahrzeuge, die zusätzlich noch einen Verbrennungsmotor zur Steigerung der rein elektrischen Reichweite besitzen. Etwa 93% der

batterieelektrisch betriebenen Fahrzeuge werden für Tagesfahrleistungen von bis zu 70 Kilometern verwendet, wohingegen dieser prozentuale Anteil bei den Fahrzeugen mit Reichweitenverlängerer erst bei einer Tagesfahrstrecke von etwa 100 Kilometern erreicht wird. Diese Diskrepanz kann z.B. durch das Auftreten von Reichweitenangst bei den Fahrern erklärt werden. Im Gegensatz zu den Fahrzeugen mit Range Extender, die einen niedrigen Ladezustand der Batterie bis zu einer nächsten Lademöglichkeit überbrücken können, müssen die rein batterieelektrischen Fahrzeuge innerhalb der Reichweite, die die Ladungsmenge ihrer Batterie ermöglicht, eine Lademöglichkeit ansteuern.

Neben der Analyse der Einzelfahr- und Tagesfahrleistung der betrachteten Gesamtflotte wurde zusätzlich auch das fahrzeugindividuelle Nutzungsverhalten ausgewertet. Als Kombination der zuvor aufgeführten Betrachtung der wöchentlichen Verwendung der Gesamtflotte sowie deren Tagesfahrleistung werden in den nachfolgenden Diagrammen (vgl. Abbildung 148 und Abbildung 149) die Anzahl an Einzelfahrten und die Tagesfahrleistung der einzelnen Projektfahrzeuge unterschieden in Werk- und Wochentage aufgezeigt. Dabei gelten die Angaben für Werk- bzw. Wochenendtage, an denen Fahrten durchgeführt worden sind. Dementsprechend gilt es zu berücksichtigen, dass, wie zuvor erwähnt, etwa 41,8% der Flottenfahrzeuge nie an einem Wochenendtag genutzt werden. Diese Größe fließt nicht in die unten aufgezeigte Statistik mit ein, so dass kein direkter Vergleich zwischen der Fahrleistung an einem Werk- und Wochenendtag auf Basis der Diagramme gezogen werden darf. Viel mehr geben die Statistiken Aufschluss darüber, welches Mobilitätsverhalten die Fahrzeuge, die fortbewegt worden sind, aufwiesen.

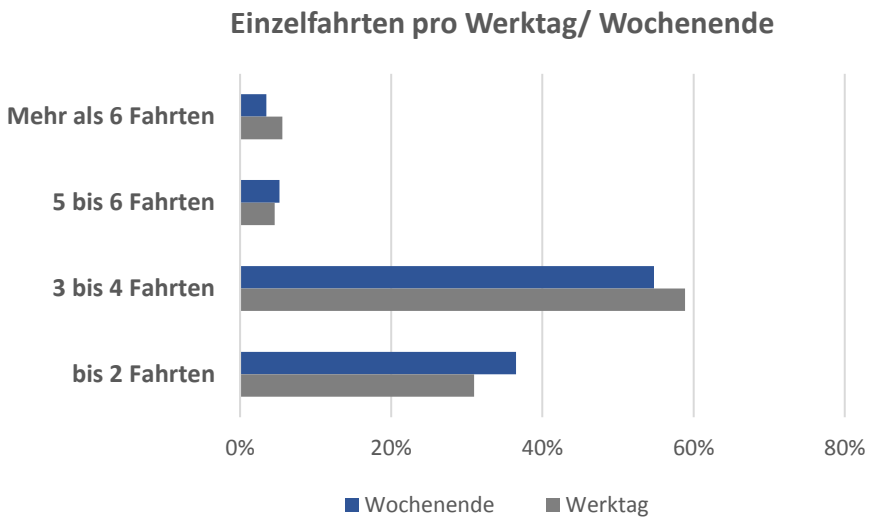


Abbildung 148: Anzahl der Einzelfahrten der Projektfahrzeuge an einem Werk- bzw. Wochentag

Da ca. 42% der Flottenfahrzeuge nie an einem Wochenendtag verwendet werden, kann festgehalten werden, dass die Elektrofahrzeuge deutlich weniger an einem Wochenendtag als an einem Werktag verwendet werden. Eine Betrachtung der Verteilung der Anzahl der Einzelfahrten zeigt jedoch, dass dann, wenn die Fahrzeuge eingesetzt werden, eine ähnliche Nutzungshäufigkeit wie an Werktagen entsteht. Es werden größtenteils höchstens vier Fahrten zurückgelegt, wobei tendenziell an einem Wochenendtag

häufiger ein bis zwei Fahrten vollzogen werden, als an einem Werktag. Mehr als fünf Fahrten werden sowohl von den Fahrern, die ihr Fahrzeug an einem Werktag nutzten, als auch von den Fahrern, die am Wochenende gefahren sind, weniger häufig angetreten.

Eine Analyse der Fahrleistung (siehe Abbildung 149) der Fahrzeuge, die an einem Werktag bzw. Wochenendtag verwendet wurden, zeigt, dass die Mehrheit der Tagesfahrleistung bis maximal 50 Kilometer aufzufinden ist. Lediglich ein Anteil von weniger als 20% legt an einem Tag mehr als 50 Kilometer zurück, wobei an einem Wochenendtag geringfügig höhere Tagesfahrleistungen als an einem Werktag zurückgelegt werden. Dabei gilt es zu beachten, dass in dieser Auswertung der Anteil der Fahrzeuge, die nie an einem Wochenendtag bewegt worden sind (etwa 42%), nicht mit einfließt. Die durchweg ähnliche Verteilung der Fahrleistungen an einem Werk- bzw. Wochenendtag lässt darauf schließen, dass vor allem Dienstwagenfahrer ihr Fahrzeug ausgiebig für private Fahrten verwenden oder aber am Wochenende ebenso dienstlich unterwegs sind wie unter der Woche. Dies demonstriert eine Nutzerakzeptanz der Elektrofahrzeuge über die gewerbliche Nutzung unter der Woche hinaus.

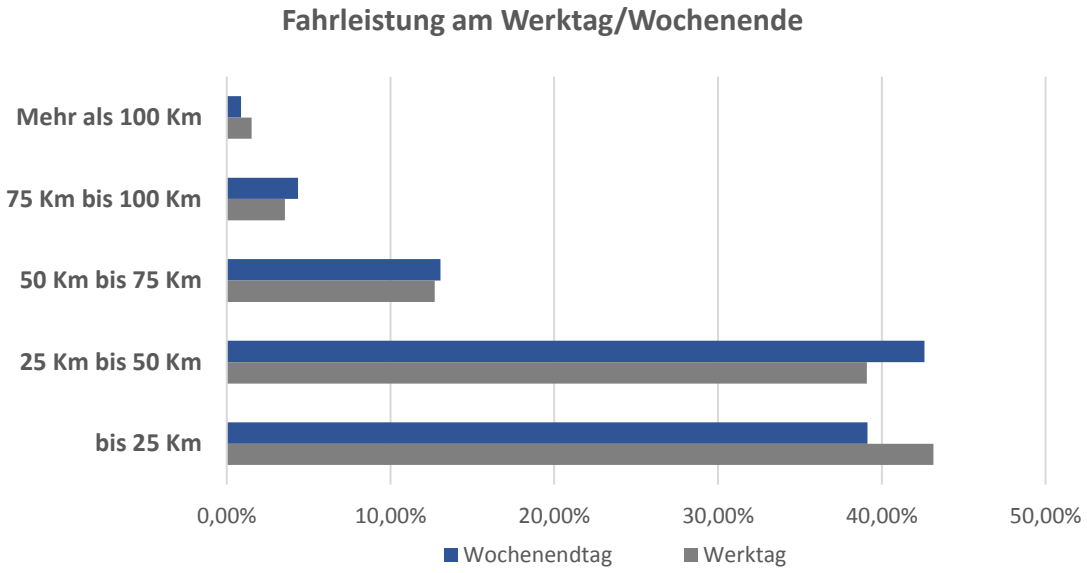


Abbildung 149: Tagesfahrleistung der Projektfahrzeuge an einem Werk- bzw. Wochentag

Die in den Abbildungen Abbildung 147 und Abbildung 149 visualisierten Tagesfahrleistungen liegen zu mindestens 93% unterhalb einer Tagesfahrleistung von 100 Kilometern. Das bedeutet, dass die Mehrheit der Fahrzeuge die vorgegebene Mindestreichweite der Fahrzeuge durch die gesamte Fahrleistung am Tag nicht ausschöpft. Dementsprechend sollten die Fahrzeuge bei Annahme einer einmaligen täglichen Aufladung der Traktionsbatterie niemals über eine zu geringe Reichweite verfügen. Demnach wäre eine Limitierung der täglichen Fahrstrecke aufgrund von Reichweitenangst ein unbegründeter Einflussfaktor.

Weitere Erkenntnisse liefert eine Analyse der allgemeinen Nutzungshäufigkeit der Elektroautos im Kontext von Fahrzeugflotten. Dabei wurde nicht gesondert nach Werk- bzw. Wochenendtagen unterschieden, sondern das gesamtheitliche Nutzungsverhalten jedes Fahrzeugs untersucht. Dazu wurde die Anzahl der

Gesamtfahrten der Fahrzeuge auf die Anzahl der Tage, an denen Fahrten unternommen wurden, heruntergebrochen. Die in Abbildung 150 aufgetragene Nutzungshäufigkeit repräsentiert die durchschnittliche Anzahl an Fahrten pro Tag hochgerechnet auf die zeitlichen Intervalle.

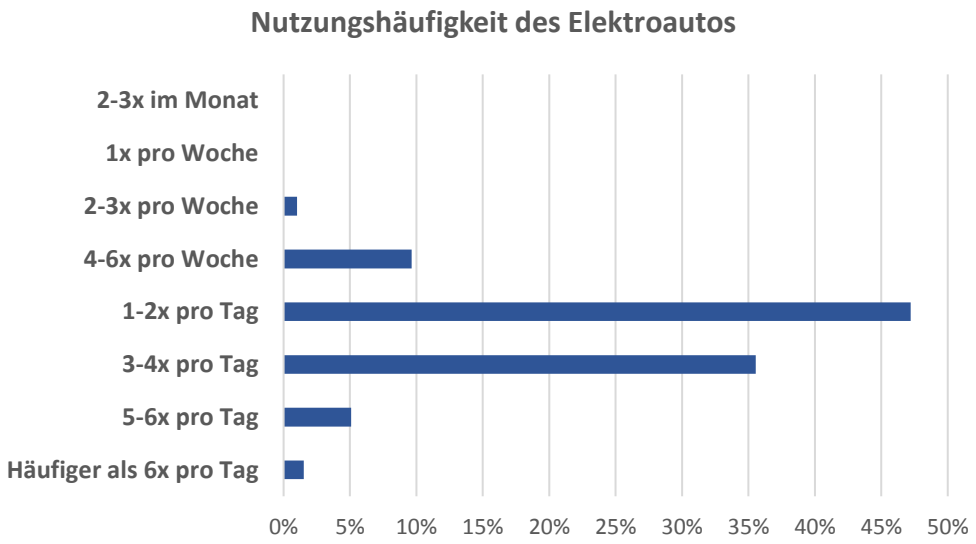


Abbildung 150: Nutzungshäufigkeit der Elektroautos pro Monat

Lediglich ca. 10,7% der Projektteilnehmer verwenden das Elektrofahrzeug durchschnittlich weniger oder in etwa 4-6-mal pro Woche. Dementsprechend nutzen etwa 90% der Projektteilnehmer das Fahrzeug mindestens durchschnittlich einmal pro Tag, wobei die größte Ausprägung der Nutzungshäufigkeit im Bereich zwischen ein bis vier Nutzungen pro Tag aufzufinden ist. Gerade bei der Verwendung der Elektrofahrzeuge als Dienstwagen spricht dies dafür, dass das Fahrzeug vornehmlich zum täglichen Transfer zum Arbeitsplatz sowie für maximal ein bis zwei weitere Fahrten eingesetzt wird. Auf Seiten der Poolnutzer stehen dagegen betriebsbedingte Einzelfahrten, die wahrscheinlich aus Gründen der begrenzten Reichweite ausschließlich zu einem gewissen Anteil durch die im Fuhrpark integrierten Elektrofahrzeuge abgedeckt werden können. Ebenso wächst mit steigender Fuhrparkgröße, in der das Fahrzeug eingesetzt wird, die Wahrscheinlichkeit, dass als Alternativen zum Elektrofahrzeug konventionell betriebene Fahrzeuge existieren. Demnach besteht die Möglichkeit, dass das Elektrofahrzeug nicht für alle zu bewältigenden Einzelfahrten genutzt wird. Diese Annahmen werden auch durch die Analyse der Startzeitpunkte der aufgezeichneten Fahrten belegt. In Abbildung 151 werden auf der Abszisse die ursprünglich in UTC gemessenen Uhrzeiten in MEZ angegeben.

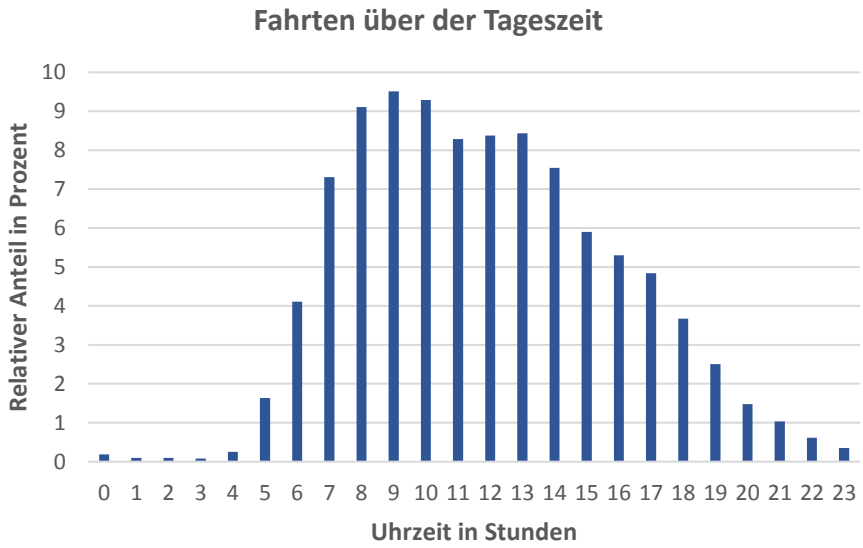


Abbildung 151: Verteilung der Zeitpunkte an denen Einzelfahrten begonnen wurde

Es wird ersichtlich, dass mehr als 90% der Fahrten zwischen 6 Uhr morgens und 18 Uhr abends angetreten werden. Besonders auffällig ist die geringe Abweichung von maximal ca. 0,7% zwischen dem relativen Anteil der Fahrtantritte zwischen 5-7 Uhr und im Zeitintervall von 16-18 Uhr. Dies lässt darauf schließen, dass diese Verteilung den Anteil an Fahrzeugen widerspiegelt, die zur An- und Abreise zum Arbeitsplatz verwendet werden. Ebenso können dem relativen Anteil an Fahrtbeginnen ab ca. 7 Uhr morgens teilweise diese Beweggründe zugeordnet werden. Alle übrigen Fahrten, die im Zeitbereich zwischen 8 und 14 Uhr angetreten worden sind, können als freizeitlich- bzw. gewerblich geprägte Fahrten klassifiziert werden. Im geringfügig ausgelasteten Zeitbereich zwischen 18 Uhr und 6 Uhr morgens stehen somit annähernd 12 Stunden als potentielle Ladezeit zur Verfügung.

Während der Fahrten sind die Fahrzeuge größtenteils im urbanen Raum unterwegs, wie eine geschwindigkeitsbasierte Schätzung des Straßentyps, auf dem sich die Fahrt vollzog, aufzeigt (siehe Abbildung 152). Dazu wurde anhand einer Auswertung der zuvor erwähnten Geschwindigkeitsbereiche des Minimaldatensatzes auf den Bereich, in dem die Fahrt wahrscheinlich stattfand, geschlossen. Eine solche geschwindigkeitsbasierte Abschätzung des Straßentyps wurde bereits in ähnlicher Form in anderen wissenschaftlichen Arbeiten angewandt.[79] Als Unterscheidung dienen die Klassen „Urbaner Raum“, „Autobahn“ sowie ein „Mix“-Zustand, in dem eine Überlappung der übrigen Bereiche auftritt. Die Verweilzeiten der Fahrzeuge in den unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereichen während einer Fahrt wurden anhand folgendem Algorithmus zu einer Straßentypklasse zugeordnet:

[79] Vgl. Neudorfer et al. (2006)

$$(t_{3-30} + t_{30-60} + t_{60-90}) > (t_{90-120} + t_{>120}) : Urbaner\ Raum$$
$$(t_{90-120} + t_{>120}) > (t_{3-30} + t_{30-60} + t_{60-90}) : Autobahn \quad (3\text{-}37)$$
$$Ansonsten : Mix$$

Das Ergebnis dieser Analyse ist Abbildung 152 dargestellt.

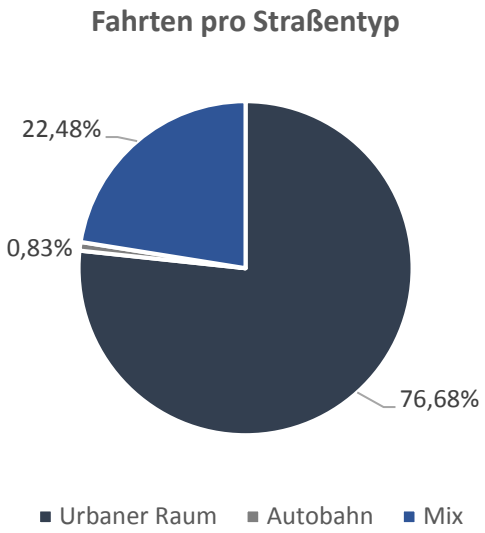


Abbildung 152: Verteilung der Fahrtanteile auf unterschiedliche Straßentypen

Diese vermittelt, dass der Großteil der Fahrten zu ca. 76,7% im urbanen Raum, also in der Stadt bzw. deren näheren Umgebung, stattfand. Lediglich 0,8% der Fahrten wurden größtenteils in einem Geschwindigkeitsbereich über 90 km/h absolviert, so dass sie einer reinen Autobahnfahrt zugeordnet werden können. Etwa 22,5% der Fahrten konnten nicht eindeutig durch die Verteilung der Geschwindigkeitsintervalle einem der Straßentyp eindeutig zugeordnet werden. Dementsprechend können diese Fahrten anteilig im urbanen Raum und auf der Autobahn durchgeführt worden sein. Dies lässt darauf schließen, dass die Mehrheit der Fahrer bewusst in näherer Umgebung zu vorhandener Infrastruktur und demnach Lademöglichkeiten mit dem Elektrofahrzeug unterwegs sind. Dies unterstreicht erneut die Tatsache, dass die Elektrofahrzeuge vorrangig für Einzelfahrten von maximal 30 Kilometern eingesetzt werden.

Bei den vorgestellten Ergebnissen gilt es dennoch zu berücksichtigen, dass diese sich ausschließlich auf eine Klassifizierung anhand der zeitlichen Verteilung der Fahranteile auf die zuvor aufgezeigten Geschwindigkeitsintervalle stützt. Dabei können etwaige Einflüsse, wie z.B. das Auftreten eines Staus, in ein Geschwindigkeitsprofil münden, welches die ursprüngliche korrekte Einordnung als Autobahn verfälscht und gegebenenfalls als Fahrt im urbanen Raum einordnet. Eine alternative Lösung stellt das sogenannte Map-Matching dar. Dieses ermöglicht den Abgleich eines GPS-Profils mit einer Geodatenbank, um unabhängig vom Geschwindigkeitsprofil eine Zuordnung zu vollziehen. Ein solcher Map-Matching-Ansatz

wurde ebenfalls im Zuge dieses Projektes anhand der aufgenommenen Fahrdaten erprobt. Er wird in Abschnitt 3.1.33 genauer erläutert.

Die Verteilung der Fahrtanteile auf die unterschiedlichen Straßentypen wird ebenfalls durch die Analyse der Geschwindigkeitsverteilung der Gesamtflotte bestätigt. Dazu wurden die sekündlichen Verteilungen auf die jeweiligen Geschwindigkeitsintervalle aus der zuvor angesprochenen Datenstruktur des Minimaldatensatzes betrachtet. Das Ergebnis ist in Abbildung 153 aufgetragen.

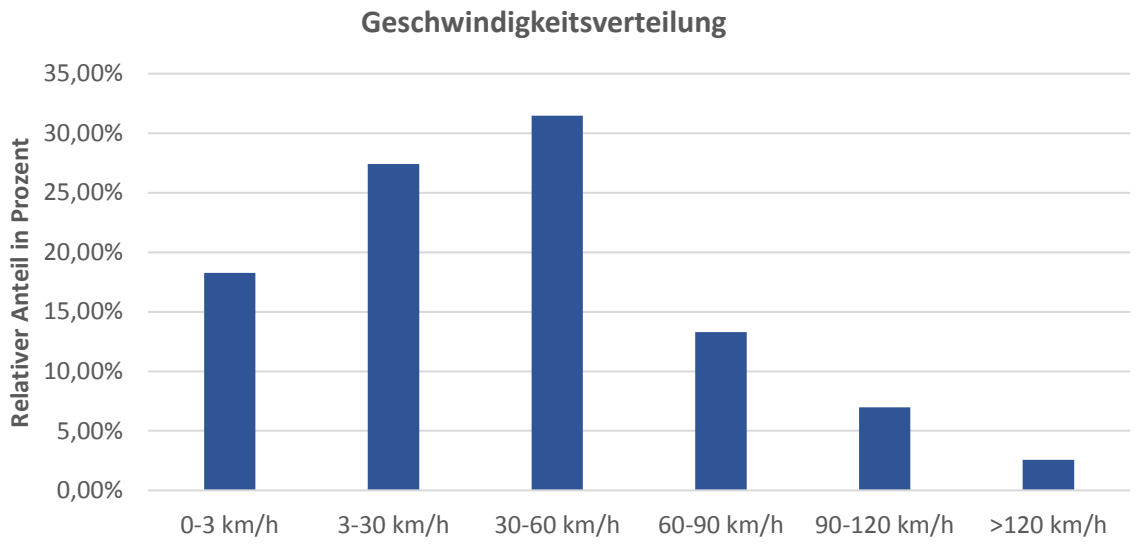


Abbildung 153: Geschwindigkeitsverteilung der Gesamtflotte

Demnach liegen mehr als 50% der Fahrtanteile in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 3 km/h und 60 km/h. Diese Geschwindigkeiten werden vornehmlich im urbanen Raum, genauer gesagt in der Innenstadt, eingehalten. Lediglich unter 5% der Gesamtfahrzeit findet mit einer Geschwindigkeit von über 120 km/h statt, wonach die Elektrofahrzeuge im Betriebsfall selten ihre Höchstgeschwindigkeit erreichen. Vielmehr werden die Fahrzeuge in Fahrzuständen bewegt, denen das Prädikat energie- bzw. verbrauchsbewusst zugeordnet werden kann. Dies bestätigt auch die Ausprägung bis zu einer Geschwindigkeitsgrenze von ca. 90 km/h, da dieser Grenzwert z.B. die Höchstgeschwindigkeit des energieoptimalen Eco Pro+ Modus des BMW i3 darstellt.[80]

Zusammenfassend lässt sich daher festhalten, dass die im Zuge des Forschungsprojektes vermessenen Fahrzeuge im Wesentlichen für ein bis vier Einzelfahrstrecken von bis zu maximal 20 bis 30 Kilometer pro Fahrt eingesetzt werden. Dementsprechend beträgt die Tagesfahrleistung der Fahrzeuge größtenteils höchstens 70 bis 100 Kilometer, wobei die Elektrofahrzeuge mit einem Range Extender grundsätzlich

[80] Vgl. ADAC (2013), S. 8

höhere Fahrleistungen zurücklegten. Bei der Nutzerakzeptanz ergab die statistische Analyse der objektiven Fahrdaten, dass die Fahrzeuge vorwiegend für gewerbliche Einsatzzwecke genutzt werden. Etwa 42% der Fahrzeuge werden nie an einem Wochenendtag eingesetzt. Es zeigt sich, dass die Fahrzeuge, die an einem Wochenendtag bewegt wurden, ähnliche Tagesfahrleistungen wie an einem Werktag absolvierten. Dabei ist auffällig, dass am Wochenende höhere Strecken pro Fahrt angetreten werden. Dies unterstreicht die Nutzerakzeptanz der Elektrofahrzeuge. Die Mehrheit der durchgeführten Fahrten fand im urbanen Raum bei Geschwindigkeiten von bis zu 60 km/h statt. Der Anteil von Autobahnfahrten mit Geschwindigkeiten über 120 km/h ist vernachlässigbar gering. Anhand der Verteilung der Geschwindigkeitsanteile wird deutlich, dass die Nutzer bestrebt waren, besonders energieoptimal zu fahren. Eine Motivation für diesen Fahrstil und die hohen Fahranteile im urbanen Raum kann z.B. auftretende Reichweitenangst darstellen, die dadurch kompensiert wird, dass die Fahrten in der Nähe von potentieller Ladeinfrastruktur im Eco Pro+ Modus der Fahrzeuge angetreten werden.

3.1.33 AP 6400 Definition, Entwicklung, Erweiterung und Durchführung von Auswertungen, sensorbasierte Datenlogger und Smartphones

Ziel des AP 6400 ist es, aus den gemessenen Datensätzen Analysen hinsichtlich verschiedener Einflussfaktoren (z.B. Nebenaggregate, Umgebungstemperaturen) auf den Energieverbrauch der Fahrzeuge zu schließen. Durch diese Analysen können detaillierte und belastbare Kenntnisse über die Zusammenhänge von Energieverbrauch, mechanischer Fahrleistung und weiteren Einflüssen gewonnen werden. Dazu werden ebenfalls weitere Analysemethoden vorgestellt, mit denen die Wissensbasis der aufgenommenen Fahrdaten erweitert werden kann.

Neben der rein statistischen Betrachtung der Fahrten (s. Abschnitt 3.1.32), können qualitative Erkenntnisse von physikalischen Zusammenhängen und Einflussfaktoren aufgrund des praktischen Einsatzes von Elektrofahrzeugen im Flottenumfeld gewonnen werden. Dazu zählen im Wesentlichen die Einflüsse der Umgebungstemperatur und des Fahrverhaltens auf den Energiebedarf der Elektrofahrzeuge. Um diese quantitativ bewerten zu können, führte der Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen eine Analyse der Zusammenhänge zwischen den Messgrößen der Außentemperatur, des Batteriestroms sowie der mit Hilfe des GPS-Signals aufgezeichneten Fahrleistung durch. Aufgrund fehlender Messwerte zur Spannung der Traktionsbatterie bzw. deren Ladezustand, wird die Einschätzung über den Energiebedarf der Fahrzeuge anhand des Ladungsbedarfs der batterieelektrischen Fahrzeuge pro Fahrt getroffen. Der Ladungsbedarf errechnet sich, wie zuvor in Abschnitt 3.1.32 aufgezeigt, durch die zeitliche Integration des vermessenen Batteriestroms. Dabei entspricht der effektive Ladungsbedarf der Differenz aus entnommener und geladener Batterieladung. Er steht zwar nicht direkt in einem linearen Verhältnis zum Energiebedarf der Fahrzeuge pro Fahrt, jedoch kann eine Abschätzung mittels einer mittleren Spannung von z.B. 360 V- 400 V erfolgen.

In Abbildung 154 ist der Ladungsbedarf der elektrifizierten Fahrzeuge in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und Fahrdistanz aufgetragen, wobei ausschließlich die Messungen der Fahrzeuge ohne Range Extender in die Auswertung einfließen. Dabei werden die Bedarfsangaben einheitlich auf eine Strecke von 100 Kilometern hochgerechnet und dementsprechend in der Einheit Ah pro 100 Kilometer angegeben. Der Energiebedarf wird aus der Gesamtheit aller Fahrten im zugehörigen Temperaturbereich bestimmt. Um einen möglichst hohen Vertrauensbereich bei der Quantifizierung des Energiebedarfs abzudecken, werden sowohl das untere und obere Quartil als auch der Median aufgetragen. Die Außentemperatur entspricht der mittleren Außentemperatur, die während der Fahrt vorlag. Sie wird aus dem Mittel des minimal und maximal aufgenommenen Temperaturwerts berechnet. Da im jeweiligen Temperaturbereich unterschiedlich viele Fahrten stattfanden, wird die genaue Fahrtanzahl in Form der gelb gezeichneten Kurve aufgezeigt.

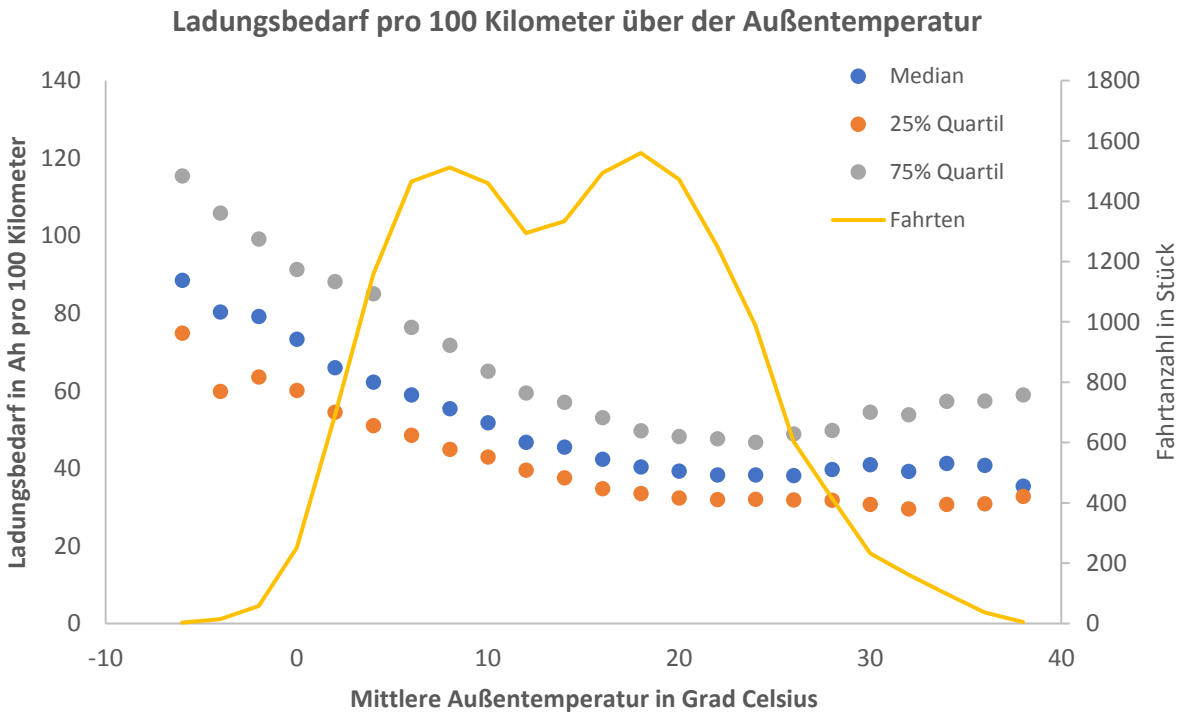


Abbildung 154: Ladungsbedarf der BEV bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen pro 100 Kilometer Fahrstrecke

Aufgrund der potentiellen Messabweichung von ±4 A der Strommesszange (s. Abschnitt 3.1.1), fällt es schwer, einen genauen Ladungsbedarf bei unterschiedlichen Außentemperaturen festzumachen. Dementsprechend kann ausschließlich das Intervall in dem der effektive Ladungsbedarf aufzufinden ist, durch die Grenzen des unteren und oberen Quartils aufgespannt werden. Der Verlauf dieser Intervallfläche zeigt, dass eine deutliche Abhängigkeit zwischen der aufzuwendenden Ladungsmenge und der Außentemperatur besteht. Dieser weist tendenziell höhere Werte bei niedrigeren Außentemperaturen auf, wobei

der Kurvenverlauf bei ungefähr 23°C seinen Tiefpunkt erreicht, so dass bei dieser Umgebungstemperatur der optimale Bedarfswert erreicht wird. Unter der Annahme von aktivierten Nebenverbraucher in Form einer Heizung bzw. einer Klimaanlage fällt auf, dass der Einfluss der Heizung bei niedrigeren Temperaturen den Effekt der Klimaanlage auf den Ladungsbedarf um bis zu 50% übersteigt. Dies kann einerseits durch den höheren Energiebedarf der Heizelemente von bis zu 7 kW zu vergleichbaren 3 kW für die Klimatisierung der Fahrerkabine erklärt werden.[81] Andererseits erfolgt bei niedrigeren Temperaturen zusätzlich zu der Aufheizung der Fahrerkabine eine Erwärmung der Traktionsbatterie. Ableitend aus diesen Ergebnissen folgt, dass abhängig von der Außentemperatur, der Ladungsbedarf und dementsprechend auch die Reichweite der Elektrofahrzeuge um bis zu 50% variieren können.

Ein ähnliches Ergebnis zeigt auch eine Auswertung des temperaturabhängigen Ladungsbedarfs der Elektrofahrzeuge in Korrelation mit der Fahrtdistanz auf (vgl. Abbildung 155).

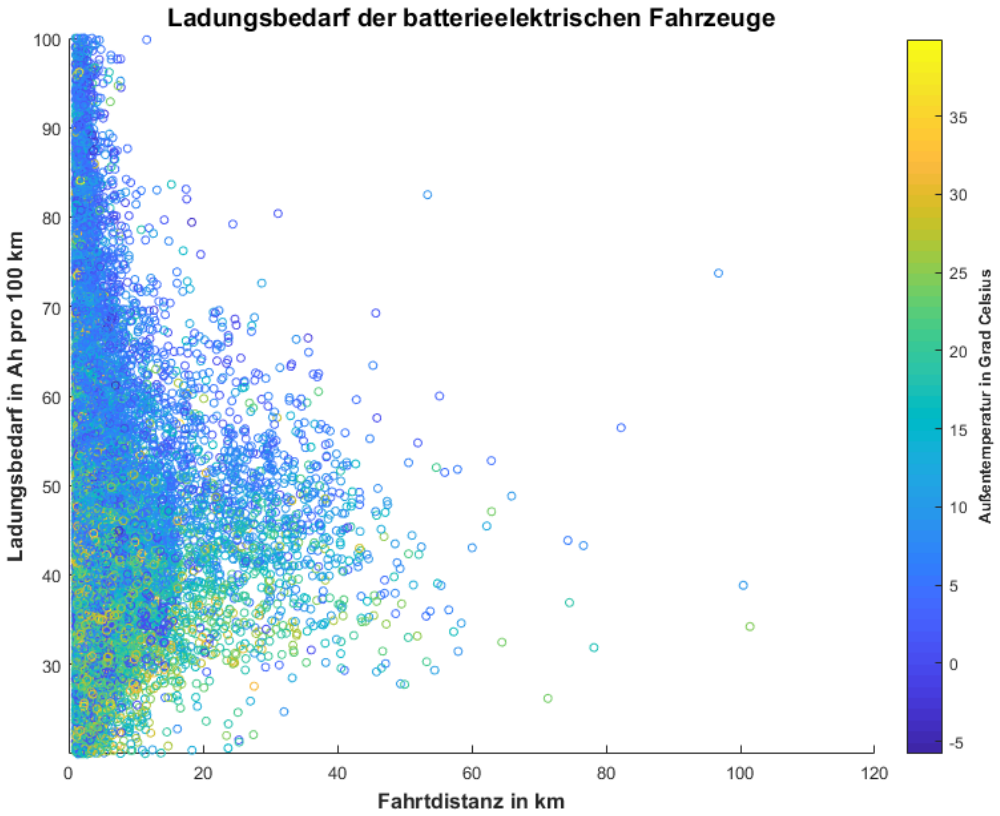


Abbildung 155: Ladungsbedarf der BEV bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen und Fahrtdistanzen

[81] Vgl. Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG (2011), S. 36

Auch in Abbildung 155 zeigt sich deutlich die Abhängigkeit zwischen der Umgebungstemperatur und dem Ladungsbedarf der Elektrofahrzeuge. Bei in etwa identischen Fahrtdistanzen im Bereich von 0 Kilometern bis 20 Kilometern benötigen die Fahrzeuge bei niedrigeren Temperaturen tendenziell um bis zu 50% mehr Ladung zur Durchführung der Fahrt. Dieser Trend hält bis ca. 5°C bzw. 10°C an. Dies setzt sich auch zu höheren Fahrtdistanzen fort, wobei der effektive Ladungsbedarf mit steigender Fahrtdistanz absinkt und in einen Bereich zwischen 30 Ah und 60 Ah mündet. Der fallende Ladungsbedarf zu höheren Fahrtdistanzen kann auf die wahrscheinlich zunehmende Rekuperationsleistung zurückgeführt werden.

Weiterhin wurde die Abhängigkeit zwischen dem Ladungsbedarf, der Umgebungstemperatur und der durchschnittlichen Geschwindigkeit während der Fahrt untersucht (vgl. Abbildung 156). Die durchschnittliche Geschwindigkeit entspricht dem Quotienten aus der Fahrtdistanz und der Fahrtdauer einer Einzelfahrt.

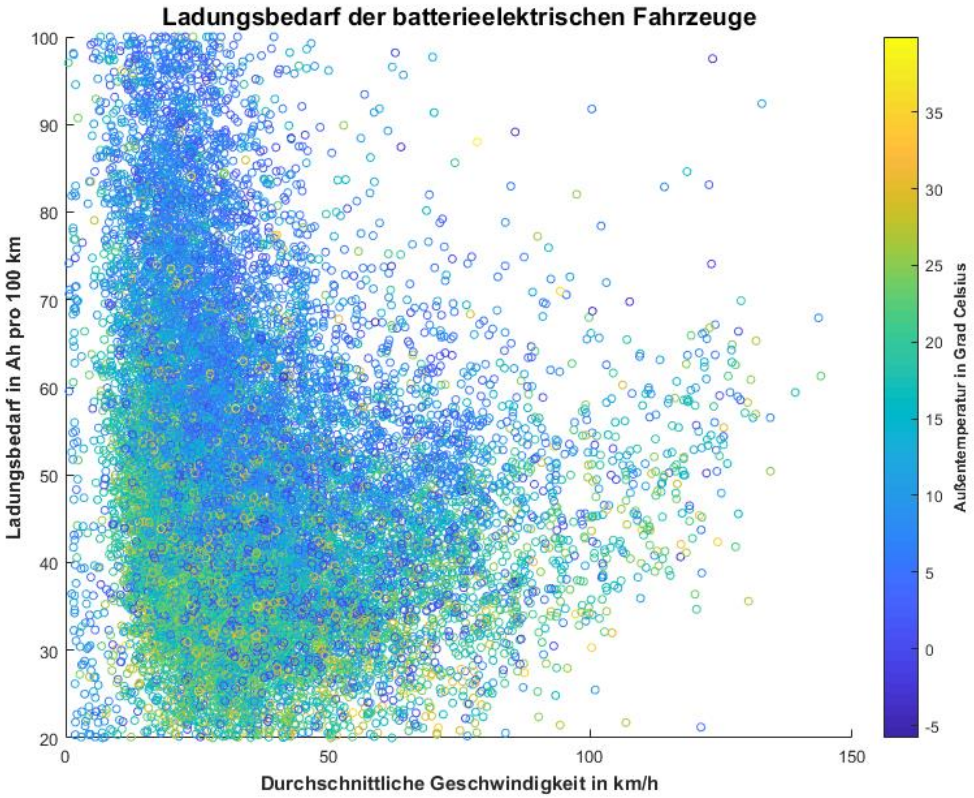


Abbildung 156: Ladungsbedarf der BEV bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen über der durchschnittlichen Geschwindigkeit

Diese demonstriert auch den erheblichen Einfluss der Außentemperatur auf den Ladungsbedarf der Fahrzeuge. Unter der Prämisse, dass die durchschnittliche Geschwindigkeit einer Fahrt charakteristisch für deren Dynamik ist, lässt sich erkennen, dass bei ähnlich dynamischer Fahrt deutlich mehr Energie bei niedrigeren Temperaturen bis ungefähr 5°C bzw. 10°C investiert werden muss. Ebenso kann ein ansteigender Ladungsbedarf bei zunehmender durchschnittlicher Geschwindigkeit ausgemacht werden. Er ist

vorrangig auf die erhöhte Beschleunigungsleistung im Gegensatz zu Fahrten bei niedriger Durchschnittsgeschwindigkeit zurückzuführen.

Der Einfluss der Außentemperatur lässt sich, wie zuvor bereits erwähnt, in erster Linie durch den zusätzlichen Energiebedarf der Heizung und Konditionierung der Traktionsbatterie erklären. Die Auswirkung der Klimaanlage scheint dagegen deutlich geringer auszufallen. Es zeigt sich, dass eine Vorkonditionierung des Innenraums des Fahrzeugs sowie der Traktionsbatterie sinnvolle Maßnahmen darstellen, um den Energiebedarf der Fahrzeuge bei niedrigeren Außentemperaturen einzudämmen. So lassen sich z.B. durch eine geeignete 20-minütige Vorkonditionierung der Fahrgastzelle bei 0 Grad Außentemperatur Reichweitengewinne von bis zu 5% erreichen.[82]

Abseits der Betrachtung des Ladungsbedarfs der Elektrofahrzeuge bei unterschiedlichen äußeren Einflüssen befassten sich weitere Arbeiten mit Möglichkeiten, die durch die Nebenaggregate verbrauchte Leistung bei batterieelektrischen Fahrzeugen zu identifizieren, der Betriebszustandserkennung von Range Extendern sowie dem Map-Matching von GPS-Daten. Wie bereits in den zuvor aufgezeigten Abbildungen zu erkennen ist, liegt eine Abhängigkeit zwischen dem Ladungs- respektive Energiebedarf eines elektrifizierten Fahrzeugs und der Umgebungstemperatur vor. Diese resultiert sowohl aus technischen Effekten, wie der Effizienz im Antriebssystem, als auch schlichtweg aus der nutzerspezifischen Verwendung von elektrischen Zusatzverbrauchern. Diese umfassen z.B. die Heizung bzw. Klimatisierung des Fahrzeugs und können einen deutlich erhöhten Energiebedarf zur Folge haben.

Bei der Konzeption der sensorbasierten Datenlogger stand die Möglichkeit der Schätzung dieser Einflüsse im Vordergrund. Bedingt durch die Tatsache, dass der Batteriestrom vermessen wird, kann mit Hilfe des genutzten Messsystems modellgestützt der Einfluss einer Zusatzleistung angenähert werden.

Da der Einfluss der Nebenaggregate auf den effektiven Verbrauch der Elektrofahrzeuge nicht direkt durch die Messwerte bewertet werden kann, wurde eine Methodik erarbeitet, die auf einem Schätzalgorithmus basiert. Dieser kann sich ausschließlich auf die aufgenommenen Messungen stützen und liefert idealerweise als Ergebnis den Anteil der von den Nebenaggregaten verbrauchten Leistung am gesamten Energiebedarf während einer Fahrt. Der dazu entwickelte Algorithmus wird nachfolgend vorstellt und erläutert.[83]

Als Eingangsgrößen des Algorithmus treten die beiden gemessenen Verläufe von Fahrgeschwindigkeit und Batteriestrom auf. Um den Anteil der Nebenverbraucher am Gesamtenergiebedarf zu ermitteln, wurde ein Konzept entwickelt, welches im Wesentlichen die elektrische Leistung des Elektromotors mit der elektrischen Leistung der Traktionsbatterie vergleicht. Alle Berechnungen erfolgen ausschließlich anhand

[82] Vgl. Nerling et al. (2016), S. 45 am Beispiel eines Nissan Leafs mit einer 24 kWh Traktionsbatterie und einer Reichweite von 199 km laut NEFZ.

[83] Weitere Informationen können Koppers et al. (2016) entnommen werden.

der Kennwerte Geschwindigkeit und Stromfluss, so dass die Umgebungstemperatur zunächst keinen direkten Einfluss besitzt. Abbildung 157 veranschaulicht die wesentliche Struktur des Schätzalgorithmus.

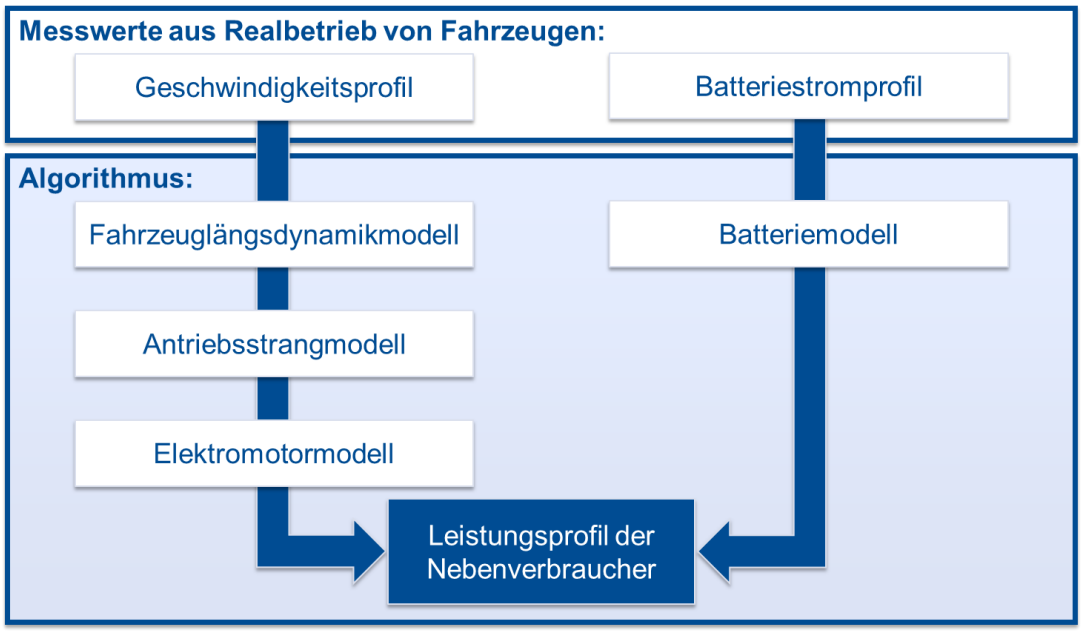


Abbildung 157: Schematische Darstellung des Algorithmus zur Berechnung der Leistung der Nebenaggregate

Anhand eines Modells zur Beschreibung der Fahrzeuglängsdynamik wird simulationsgestützt die Antriebsleistung, die aus dem Geschwindigkeitsprofil abgeleitet werden kann, berechnet. Dazu werden zunächst die Einzelfahrwiderstandsleistungen bestimmt. Diese setzen sich aus dem Luftwiderstand, dem Steigungswiderstand, dem Rollwiderstand sowie dem Beschleunigungswiderstand zusammen. Aus diesen Fahrwiderstandsleistungen kann anschließend die Antriebsleistung des Fahrzeugs ermittelt werden, welche zum Erreichen der Fahrzustände, die das Geschwindigkeitsprofil abbildet, erforderlich ist. Die Antriebskraft entspricht der Zugkraft, die durch den Motor über den Antriebsstrang effektiv zur Beschleunigung des Fahrzeugs generiert wird.

Da innerhalb des Antriebsstrangs Wirkungsgradverluste sowie Getriebeübersetzungen auftreten, wird mit Hilfe eines Simulationsmodells auf die notwendige effektive Last des Elektromotors als Antriebsaggregat zurückgerechnet. Diese setzt sich aus der Kombination Drehzahl / Drehmoment zusammen und definiert eine mechanische Leistung. Über die Anbindung eines stationären Elektromotormodells, welches durch ein zweidimensionales Kennfeld beschrieben wird, wird abschließend unter Berücksichtigung des elektromechanischen Wirkungsgrads des Motors die erforderliche elektrische Leistung zur Umsetzung dieser berechneten mechanischen Leistung bestimmt. Weiterhin werden im elektrischen Teilsystem die Wirkungsgrade der notwendigen Leistungselektronik berücksichtigt. Der gesamte elektrische Antriebsstrang ist in Abbildung 158 dargestellt.

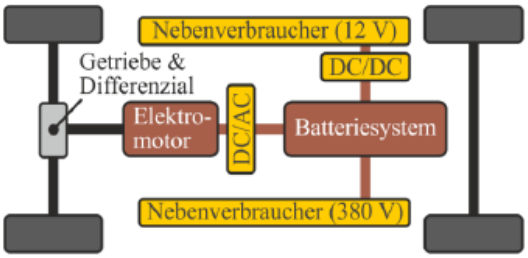


Abbildung 158: Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs (Koppers et al. (2016))

Durch einen direkten Vergleich mit der zugehörigen elektrischen Abgabeleistung der Batterie kann der Anteil des auf die Nebenaggregate entfallenden Verbrauchs abgeschätzt werden. Diese setzt sich im Wesentlichen aus der Differenz zwischen der elektrischen Leistung, die aus der Batterie entnommen wurde, sowie der elektrischen Leistung, die der Elektromotor zur Umsetzung der gewünschten Fahrzustände benötigt, zusammen. Da lediglich der Batteriestrom als Messwert zur Verfügung steht, bedarf es einer simulationsgestützten Berechnung der elektrischen Spannung der Traktionsbatterie mit Hilfe eines Batteriemodells. Als Batteriemodell wird ein innenwiderstandsbasiertes Simulationsmodell angewendet. Dieses ist in erster Linie von den inneren Systemzuständen der Temperatur, des Stroms sowie des Ladezustands der Batterie abhängig. Da die Batterietemperatur sowie der Ladezustand keine Messgrößen darstellen, bedarf die Simulation zu Beginn einer Abschätzung dieser Einflussparameter zu Fahrtbeginn. Durch die Anwendung der Modelle für die Fahrzeuglängsdynamik und die Effizienz des Antriebssystems sowie für die eingesetzte Traktionsbatterie kann in Summe ein Leistungsprofil der Nebenverbraucher berechnet werden.

Anhand verschiedener Validierungsmaßnahmen wurde die Leistungsfähigkeit des Schätzalgorithmus in der zuvor angesprochenen Veröffentlichung anhand existierender Fahrzyklen, Messungen an einem Hardware-in-the-Loop-Prüfstand sowie realen Fahrzeugmessungen untersucht Abbildung 159.

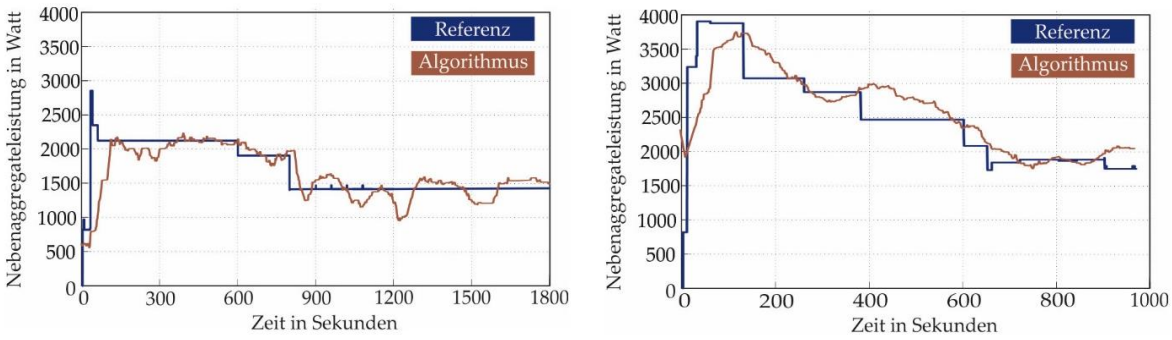


Abbildung 159: Berechnete Nebenverbraucherleistung im WLTC (links) und LA92-Zyklus (rechts) (Koppers et al. (2016))

Die in Abbildung 159 dargestellten Verläufe wurden anhand eines Simulationsmodells validiert. In dem Beitrag wurde zudem auf einen Vergleich mit Messungen an einem HiL[84]-Prüfstand und erste Testreihen an realen Flottenfahrzeugen eingegangen. Diese realen Flottenfahrzeuge wiesen im Gegensatz zu den im Zuge dieses Forschungsprojektes vermessenen Fahrzeugen Messwerte für die batterieinternen Zustände der Spannung, der Batterietemperatur sowie des Ladezustands auf. Letztlich konnte eine ausreichende Genauigkeit nur unter Kenntnis einiger wesentlicher Parameter gezeigt werden. Sind die entsprechenden Parameter nicht exakt bekannt, variiert die Modellgüte erwartungsgemäß stark.

Die Abweichungen zum Referenzwert im Vergleich zu bekannten Parametern sind in Tabelle 80 angegeben.

Tabelle 80: Sensitivität der Durchschnittswerte der Nebenaggregate bei Ungenauigkeiten in der Parametrierung

Parameter	bekannt	Masse (1644 kg)		Luftwiderstand		SOC (t=0)	
Änderung	100%	105%	110%	105%	110%	90%	50%
relativer Energiebedarf AUX	-0,70%	-9,00%	-15,80%	-4,39%	-7,98%	-7,92%	-33,42%
relative mittlere Leistung	-2,55%	-10,51%	-17,07%	-5,55%	-8,45%	-9,17%	-32,72%

Insbesondere die Fahrzeugmasse kann hierbei leicht um mehrere hundert Kilogramm z.B. durch Mitfahrer und/oder Beladung im Kofferraum schwanken. Die Abweichungen bei der Komponente Luftwiderstand kann zum einen durch das Öffnen eines Fensters mit einhergehender Erhöhung des Luftwiderstandsbeiwertes oder zum anderen durch die Änderung der Luftdichte begründet sein. Bei der Luftdichte reicht bereits das Absinken der Umgebungstemperatur um rund 25 K aus, um eine Erhöhung von 10% zu verursachen.

Da die zuvor angesprochenen Modellparameter nur schätzungsweise für die Fahrten der Projektfahrzeuge getroffen werden können bzw. gar nicht bekannt sind, sind bei der Anwendung des Algorithmus

[84] **H**ardware-**i**n-the-**L**oop

auf reale Messwerte, die im Zuge dieses Forschungsprojektes aufgenommen wurden, weitere Ungenauigkeiten zu erwarten. Um diese bewerten zu können, wären noch detailliertere Analysen der Einflüsse auf die ermittelten Differenzleistungsverläufe anhand z.B. realer Fahrversuche notwendig.

Neben der Untersuchung einer Möglichkeit zur Abschätzung der Nebenaggregateverbräuche in batterieelektrischen Fahrzeugen befassten sich weitere Studien mit der Machbarkeit der Betriebszustandserkennung des Range-Extenders anhand der aufgenommenen Fahrdaten.[85] Die Kenntnis des Betriebszustandes des Range-Extenders im realen Fahrbetrieb ist eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung des Nutzerverhaltens. Unter normalen Umständen dient der Verbrennungsmotor lediglich der Verlängerung der Reichweite eines Elektrofahrzeugs bei Unterschreiten eines in der Betriebsstrategie hinterlegten Ladezustands der Traktionsbatterie. Jedoch ist auch eine manuelle Aktivierung des Verbrennungsmotors durch den Fahrer möglich. Anhand der Bewertung von Fahrtanteilen mit laufendem Verbrennungsmotor können Prognosen darüber getroffen werden, ob ein bestehendes Fahrprofil mit Hilfe eines batterieelektrischen Fahrzeugs zu bewältigen ist oder ob eine Antriebsmöglichkeit in Form eines Plug-In-Hybrids eine geeignetere Alternative darstellt. Besonders ein dauerhafter Betrieb des Range-Extenders wirkt sich durch die doppelte Wirkungsgradwandlung nicht optimal auf den Verbrauch und die CO_2-Emissionen des Fahrzeugs aus.

Die eindeutige Abschätzung des Betriebszustandes des Range-Extenders anhand der vorgestellten Datengrundlage wird durch weitere energetische Einflüsse erschwert. Ein Auftreten von Rekuperation bei einem Bremsvorgang bewirkt z.B. ebenfalls eine Rückspeisung von elektrischer Ladung in die Traktionsbatterie. Dementsprechend kann bei einem Bremsvorgang mit aktivem Range Extender auf Datengrundlage des Batteriestroms nicht zwischen beiden Einflussfaktoren unterschieden werden.

Um den Betriebszustand des Verbrennungsmotors dennoch möglichst genau schätzen zu können, wurde ein Konzept auf Grundlage von maschinellen Lernverfahren entwickelt. Durch ein vorwärts gerichtetes neuronales Netz wird anhand der Beziehungen zwischen aufgenommenen Geschwindigkeitsprofil und Stromfluss von und aus der Traktionsbatterie ermittelt, ob der Verbrennungsmotor des Range Extenders eingeschaltet ist oder nicht.

Die Anwendung eines neuronalen Netzes zur Erkennung von Ereignissen erfordert grundsätzlich das sogenannte Training mit einer Datenbasis, in der der abzubildende Zusammenhang hinterlegt ist. Folglich wurden neben den aufgenommenen Geschwindigkeits- und Stromverläufen auch Informationen über den Betriebszustand des Range-Extenders benötigt. Da im Zuge dieses Forschungsprojektes keine Messgrößen vorlagen, die einen eindeutigen Aufschluss über den Betriebszustand vermitteln, wurde ein Projektfahrzeug um weitere Sensorik und einen Rechner erweitert. Bei diesem Projektfahrzeuge handelte es sich um einen BMW i3 mit Range-Extender. Die genaue Platzierung der Messsensorik ist in Abbildung 160 aufgezeigt.

[85] Weitere Informationen können Blume et al. (2017) entnommen werden

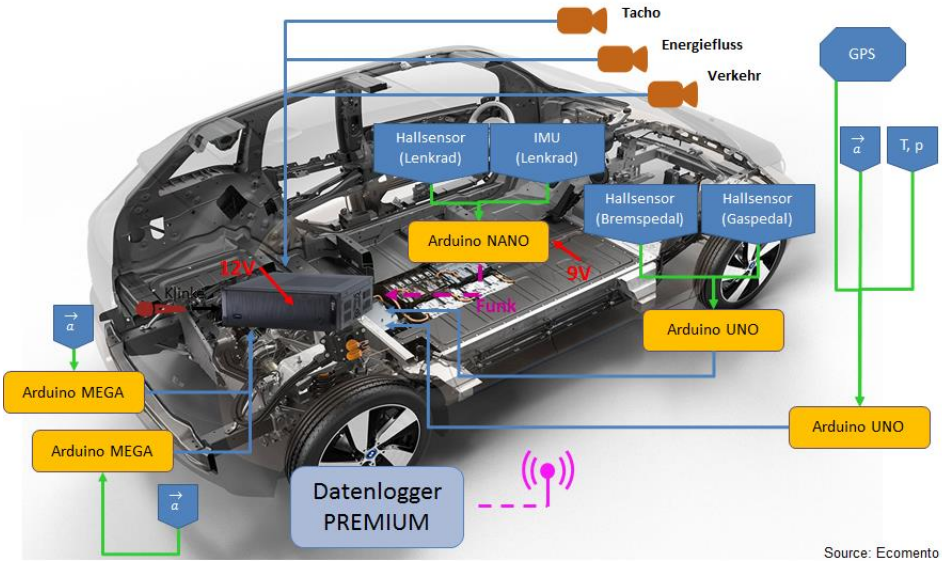


Abbildung 160: Erweiterung eines Projektfahrzeugs um zusätzliche Sensorik und Auswerteeinheit (Blume et al. (2017), ecomento (2013))

Zur Erweiterung der bestehenden Datenbasis um die Information des Betriebszustands des Range-Extenders, wurde eine Funktion des BMW i3 verwendet. Der vermessene BMW i3 mit Range-Extender besitzt die Möglichkeit, den wirkenden Energiefluss im Antriebsstrang auf dem Bordcomputer zu visualisieren. Dies gewährt eine ausreichend genaue Kenntnis darüber, ob der Verbrennungsmotor ein- oder ausgeschaltet ist. Wie aus der schematischen Darstellung in Abbildung 160 ersichtlich wird, wurden drei Kameras in den Messaufbau integriert. Eine Kamera zeichnete dabei dauerhaft den Energiefluss zwischen Batterie und Antriebsstrang auf. In Abbildung 161 lässt sich die Visualisierung des Verbrennungsmotors im aktivierten Zustand im linken Bildabschnitt erkennen.

Abbildung 161: Darstellung des Energieflusses auf dem Bordcomputer mit aktiviertem (links) und deaktiviertem (rechts) Range-Extender (Blume et al. (2017))

Damit eine ausreichend große und repräsentative Datenbasis zum Training des neuronalen Netzes vorlag, wurden in einem Zeitraum von 4 Wochen durch 10 Fahrer 84 Fahrten mit dem Messfahrzeug durchgeführt. Dabei wurde eine Gesamtkilometerzahl von ca. 2.000 Kilometern zurückgelegt, wobei der Range-Extender sowohl zu festgelegten Einschaltzeitpunkten als auch manuell aktiviert wurde. Neben einem kleinen Anteil von freien Fahrten wurde größtenteils eine festgelegte Versuchsstrecke befahren, um vergleichbare Messungen zu erhalten. Die genaue Versuchsstrecke ist in Abbildung 162 dargestellt.

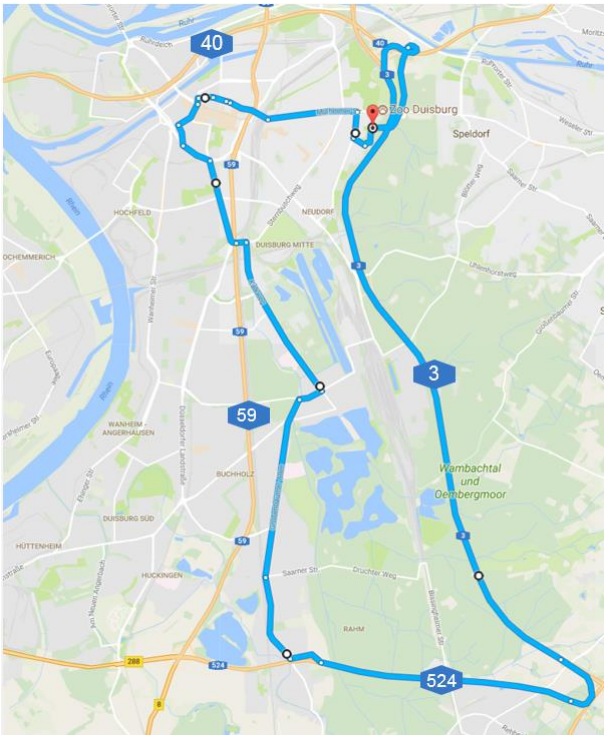


Abbildung 162: Versuchsstrecke zur Generierung einer repräsentativen Datenbasis (Blume et al. (2017))

Die Strecke befindet sich im Großraum Duisburg und umfasst sowohl Stadt- als auch Land- als auch Autobahnanteile.

Um eine einheitliche Datenbasis zu verwenden, wurden die Betriebszustände des Range-Extenders über einen mitgeschriebenen Zeitstempel mit den aufgenommenen Messwerten des Datenloggers synchronisiert. Dabei wurden alle Messreihen auf die Aufzeichnungsrate der Strommesszange von 10 Hz interpoliert. Aufgrund von Komplikationen durch wechselnde Lichtverhältnisse zeigten sich Schwächen bei der automatisierten Erkennung des Zustands des Verbrennungsmotors, so dass als Lösungsalternative die gesamte Bewertung des aufgenommenen Bildmaterials manuell durch Mitarbeiter des Lehrstuhls für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen erfolgte. Schlussendlich lagen als potentielle Eingänge für das neuronale Netz die zeitlich aufeinander abgestimmten Geschwindigkeitsprofile, Batterieströme sowie die Betriebszustände des Range-Extenders vor. Da ein vorwärts gerichtetes neuronales Netz nicht in der

Lage ist, zeitliche Zusammenhänge abzubilden, wurden weiterhin noch die Beschleunigung sowie die elektrische Ladung aus der zeitlichen Ableitung bzw. der Integration der Messwerte berechnet. Somit konnte nachträglich eine Zeitabhängigkeit in dem maschinellen Lernverfahren realisiert werden.

Für die Identifikation der Fahranteile mit eingeschaltetem Range-Extender wurden demnach folgende Kennwerte verwendet

- die GPS-Geschwindigkeit $v(t)$,
- die GPS-Beschleunigung $a(t)$,
- der Batteriestrom $I(t)$,
- die elektrische Ladung $Q(t)$.

Die GPS-Beschleunigung und die elektrische Ladung sind keine Sensorsignale, sondern synthetisch erzeugte Eingänge. Da es sich bei den verwendeten neuronalen Netzen um vorwärts gerichtete Modelle handelt, werden auf diese Weise dem Modell zeitvariante Informationen zur Verfügung gestellt. Die GPS-Beschleunigung ist der Differenzenquotient zweier aufeinander folgender Geschwindigkeiten, d.h.

$$a(t) = \frac{v(t+h) - v(t)}{h} \tag{3-38}$$

wobei h die Aufzeichnungsrate ist. Die elektrische Ladung $Q(t)$ wird durch das gleitende Integral des Batteriestroms $I(t)$ berechnet. Als gleitendes Integral wird in diesem Beitrag das Integral bezeichnet, welches nicht über die komplette Fahrt gebildet wird, sondern lediglich über ein zeitliches Fenster der Länge d um den betrachteten Zeitpunkt t. Dies besitzt den Vorteil, dass auch kleine zeitliche Veränderungen im Signalverlauf auftreten. Hier wurde eine Fenstergröße von $d = 100$ Datenpunkten gewählt, was bei einer Aufzeichnungsrate von 0,1 Sekunden einem Zeitfenster von 10 Sekunden entspricht. Diese Fenstergröße wurde innerhalb einer Optimierung ermittelt. Die verwendeten Signale werden in Abbildung 163 und Abbildung 164 schematisch dargestellt.

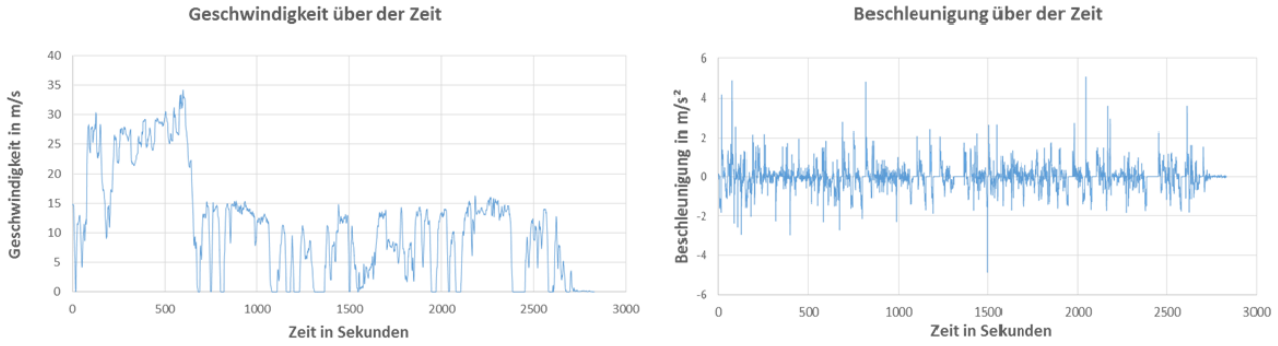


Abbildung 163: Zeitabhängiges Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil

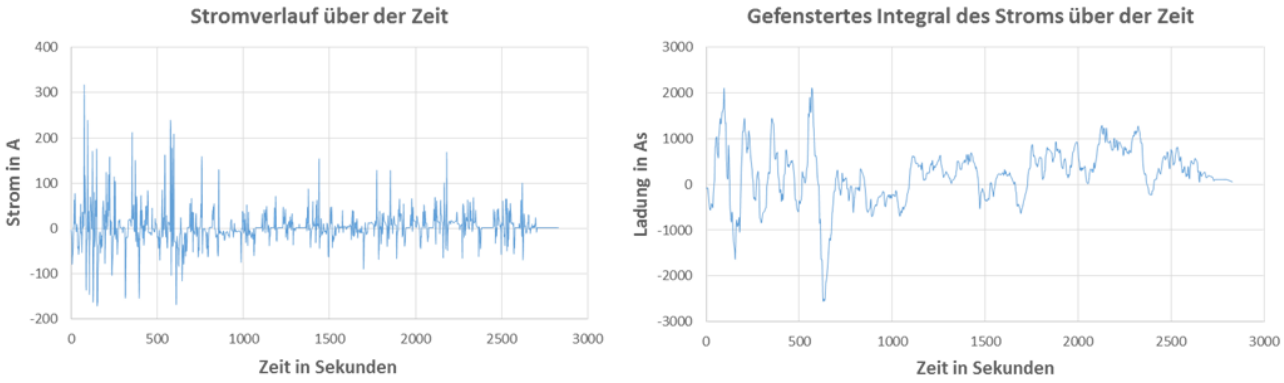


Abbildung 164: Zeitabhängiges Stromfluss und Ladungsprofil

Um große Unterschiede in der Größenordnung zu vermeiden, wurden weiterhin alle Eingänge auf das Intervall $[0,1]$ normiert.

Zum Training, Validieren und Testen des neuronalen Netzes wurde die Gesamtheit der aufgenommenen Datensätze in Trainings- Validierungs- und Testdaten eingeteilt. Dabei erwies sich ein Verhältnis von 70% Trainings- gegenüber 15% Validierungs- und 15% Testdaten als vorteilhaft.

Das Ergebnis des Schätzalgorithmus auf Basis eines vorwärts gerichteten neuronalen Netzes wird in Abbildung 165 anhand des zeitlichen Verlaufs einer beispielhaft gewählten Fahrt präsentiert.

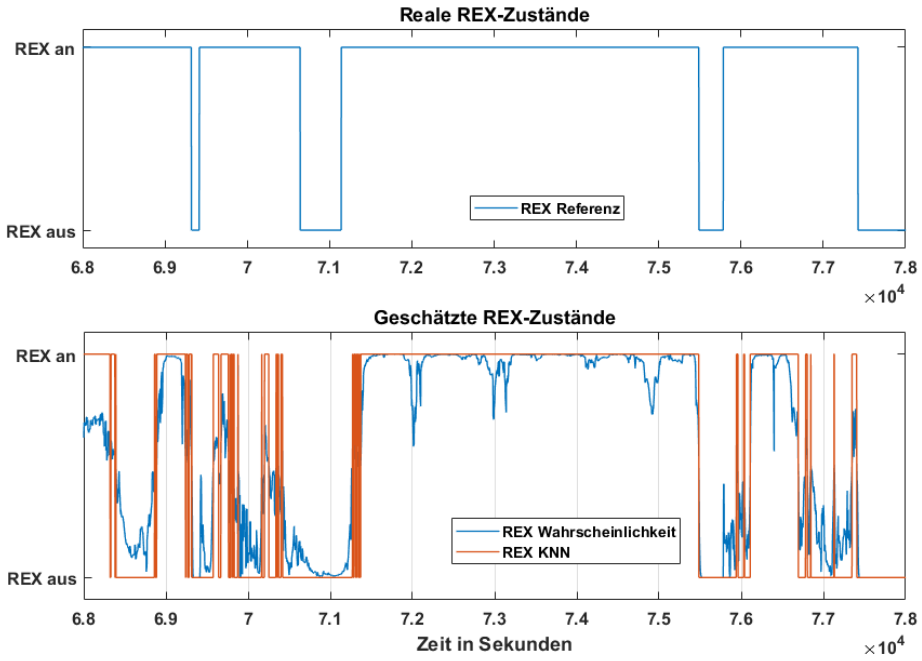


Abbildung 165: Geschätzte und reale Zustände des Range Extenders während einer Fahrt

Die blaue Kurve im unteren Abschnitt der Abbildung 165 entspricht der prozentualen prognostizierten Wahrscheinlichkeit des neuronalen Netzes, dass der Range-Extender im Betrieb ist. Eine Wahrscheinlichkeit von 50% oder höher wird im Zuge dieses Lösungsansatzes als laufender Range-Extender interpretiert. Dementsprechend entspricht eine Wahrscheinlichkeit von weniger als 50% einem deaktivierten Verbrennungsmotor. Der daraus resultierende Verlauf des geschätzten Betriebsmodus ist in Orange aufgezeigt.

Anhand eines Vergleichs der realen und geschätzten Betriebszustände des Range-Extenders wird deutlich, dass das Modell das Nutzungsverhalten noch nicht vollständig darstellen kann. Jedoch werden die Übergänge von einem ausgeschalteten Range-Extender in den eingeschalteten Zustand sowie langanhaltende Phasen in einem Betriebszustand größtenteils abgebildet.

Die Qualität des trainierten Netzes kann mit Hilfe der Wahrheitsmatrix bewertet werden (vgl. Tabelle 81). Dabei werden die durch das Netz geschätzten Betriebszustände des Range-Extenders mit den referenzierten Zuständen, die aus der Analyse der aufgenommenen Bildmaterialien bekannt sind, verglichen.

Tabelle 81: Wahrheitsmatrix des trainierten neuronalen Netzes (in Anlehnung an Blume et al. (2017))

Referenz \ Modell	REX an	REX aus
REX an	True positive 67.1%	False positive 32.9%
REX aus	False negative 9.6%	True negative 90.4%

Das Modell kann die Betriebszustände „REX an“ oder „REX aus“ entweder korrekt oder aber genau entgegengesetzt ausgeben, wobei die Anteile der korrekt prädizierten Zustände auf der Hauptdiagonalen der Wahrheitsmatrix aufzufinden sind. Folglich besitzt das neuronale Netz eine hohe Prädiziergüte, wenn die Werte der Hauptdiagonalen möglichst nahe bei 1 bzw. 100% liegen. Dementsprechend müssen die Anteile auf der Gegendiagonalen, die für fehlerhafte Ergebnisse steht, möglichst nahe 0 bzw. 0% sein. Aus der Betrachtung der Hauptdiagonalen fällt auf, dass der Betriebszustand „REX aus“ zu 90,4% richtig erkannt wurde. Im Gegensatz dazu erreicht das Netz bei der richtigen Abbildung des Betriebszustandes „REX an“ lediglich eine Genauigkeit von knapp unter 70%, so dass der Anteil an fehlerhaft prädizierten Ergebnissen mit über 30% relativ hoch ausfällt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das neuronale Netz grundsätzlich dazu in der Lage ist die Charakteristik der realen physikalischen Zusammenhänge abzubilden. Besonders die zeitlichen Anteile, an denen der Range-Extender ausgeschaltet war, konnten zu über 90% richtig abgeschätzt werden. Die für den Verbrauch der Elektrofahrzeuge mit Range-Extender relevante Größe, der Betrieb des Range-Extenders, kann dagegen nur mit einer moderaten Genauigkeit bestimmt werden. Dementsprechend besitzt das Netz derzeit noch nicht die Qualität, um als Vorhersagemodell für Verbrauchsberechnungen bzw. zur Analyse von Nutzungsverhalten der Fahrer mit einem batterieelektrischen Fahrzeug mit Range-Extender angewendet zu werden. Begründet werden kann dies durch den Einsatz eines vorwärts gerichteten Netzes ohne Rückführungsebene. Rückgekoppelte oder rekurrente neuronale Netze könnten Informationen aus vorangegangenen Berechnungen zum aktuellen Zeitpunkt überführen und dementsprechend die Qualität des Schätzmodells steigern.

Abseits der bereits vorgestellten Lösungsansätze zur Identifikation der Einflüsse von Nebenverbrauchern und des Range-Extenders wurde weiterhin ein Verfahren zum Map-Matching der Fahrdatensätze entwickelt. Es basiert auf den Kartendaten der frei verfügbaren OpenStreetMap[86]-Datenbank und besitzt die Aufgabe, die aufgenommenen Messwerte des Datenloggers um Information aus einer Geodatenbank zu erweitern. Dazu werden die vermessenen GPS-Daten der Fahrten mit eingetragenen Informationen von Kartenzügen verglichen und einem Straßenzug zugeordnet. Somit können z.B. die maximal zulässige Geschwindigkeit an dieser Position sowie der Straßenname und dessen Typ bestimmt werden. Dies gewährt zusätzlich Eindrücke bezüglich des Nutzungsverhaltens der Fahrzeuge, wie z.B. ob eine eingehaltene Höchstgeschwindigkeit aufgrund von Geschwindigkeitsbeschränkungen oder persönlichem Fahrstil eingehalten wurde. Daraus können beispielsweise zukünftig charakteristische Fahrerprofile generiert und repräsentative Fahrzyklen entwickelt werden.

Nachfolgend wird der Algorithmus zum Map-Matching der Fahrdaten erläutert sowie dessen Ergebnisse vorgestellt.

Durch eine entwickelte Schnittstelle zu MATLAB werden für jeden GPS-Punkt einer Fahrt jene Geodaten der Straßenzüge, die innerhalb eines Radius von 100 Meter um den Messpunkt liegen, aus der OpenStreetMap-Datenbank ausgelesen. Diese Schar an Geodaten wird anschließend fusioniert, analysiert und gefiltert, so dass lediglich die Straßenzüge, auf denen Fahrzeuge bewegt werden dürfen, resultieren. Der schematische Ablauf ist in Abbildung 166 visualisiert.

[86]: OpenStreetMap ist eine freie Geodatenbank. Das Projekt wurde im Jahre 2004 gegründet. Weitere Informationen können OpenStreetMap (2017) entnommen werden.

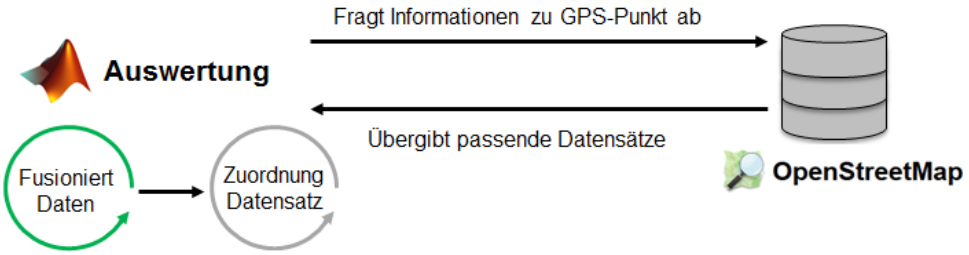


Abbildung 166: Schematische Darstellung des Funktionsablaufs Map-Matching

Daraufhin erfolgt eine stochastische Auswertung der verbliebenen Geodaten. Dabei wird der Straßenzug als wahrscheinlichstes Ergebnis interpretiert, der größtenteils in der Schar von Geodaten auftritt. Um Zuordnungsfehler zu korrigieren, erfolgt zum Abschluss für jeden GPS-Datenpunkt ein Abgleich mit der Zuordnung umliegender GPS-Datenpunkten aus der Messreihe. Treten dabei starke Abweichungen auf, so werden diese durch die Annahme, dass das Fahrzeug nicht sekündlich die Straße wechselt, korrigiert.

Dieser Vorgang ist beispielhaft in Abbildung 167 dargestellt. Die Position $P3$ weicht potentiell von der Straßenzuordnung der übrigen Punkte ab, da sie sowohl Straße r_1 als auch Straße r_2 zugeordnet werden könnte. Anhand eines Abgleichs mit den umliegenden Positionen kann die Position jedoch korrekterweise der Straße r_1 zugeteilt werden.

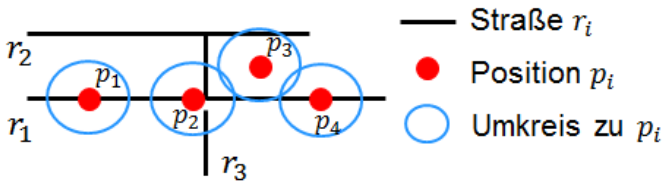


Abbildung 167: Beispielhafte Anordnung von GPS-Positionen auf Straßenzügen

Das Ergebnis des Map-Matching-Algorithmus ergibt eine um Geodaten erweiterte Fahrt. Sie gewährt z.B. einen erweiterten Einblick auf das Geschwindigkeitsprofil des Fahrers oder das Auftreten eines Staus während der Fahrt. Dies wird exemplarisch in Abbildung 168 und Abbildung 169 anhand der Geschwindigkeitsprofile eines BMW i3 REX- sowie eines PHEV-Fahrzeugs dargestellt, wobei ein nicht zuzuordnender Straßentyp in Grau, eine städtische Umgebung in Grün, eine Landstraße in Gelb sowie eine Autobahn in Rot veranschaulicht wird. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit wird mit Hilfe der schwarzen Schranke angegeben.

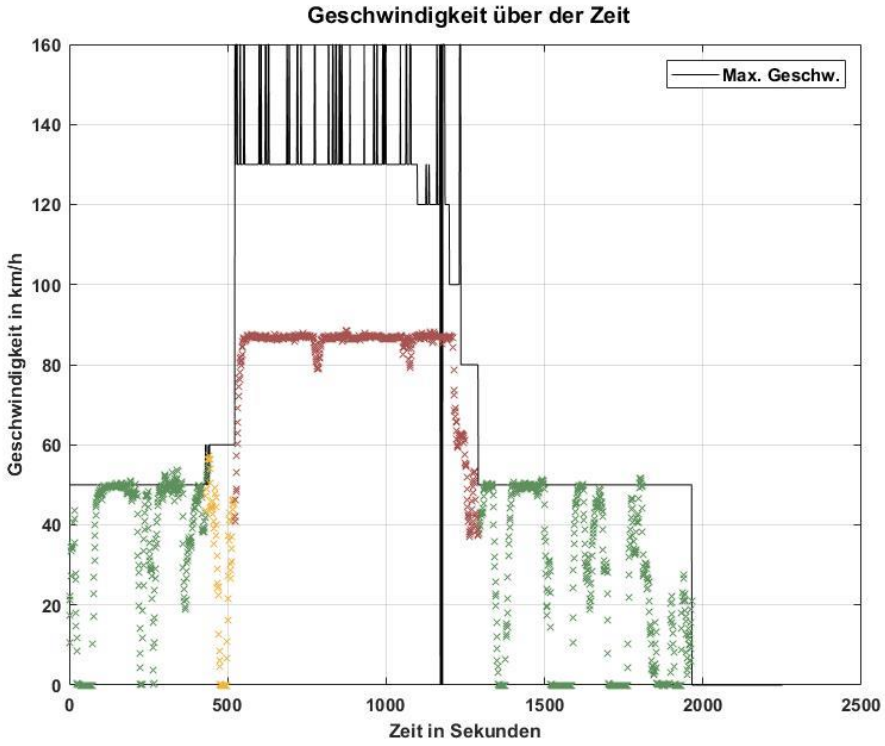


Abbildung 168: Fahrprofil eines BMW i3-REX-Fahrzeugs auf unterschiedlichen Straßentypen

Der zeitlich aufgetragene Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit demonstriert eine gemischte Fahrt mit Fahranteilen in der Stadt, auf einer Landstraße sowie auf der Autobahn. Dabei bewegt sich das Fahrzeug zu Beginn im städtischen Raum, wechselt dann kurzzeitig auf eine Landstraße, um dann einen längeren Fahrtanteil auf der Autobahn zurückzulegen. Zum Ende der Fahrt kehrt das Fahrzeug erneut in den städtischen Bereich zurück. Im Zeitraum der in rot markierten Autobahnfahrt lässt sich der wesentliche Vorteil des Map-Matchings erkennen. Üblicherweise würde eine maximale Geschwindigkeit von 90 km/h bei vorherigen Fahranteilen im urbanen Raum charakteristisch für eine Fahrt auf einer Landstraße stehen. Mit Hilfe der Geodaten wird jedoch eine ca. 700 sekündige Fahrt mit verhältnismäßig geringer Geschwindigkeit auf einer Autobahn korrekt erkannt.

Wie an dem aufgezeigten Geschwindigkeitsprofil in Verbindung mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit erkennbar ist, unterschreitet der Fahrer auf der Autobahn mit einer annähernd konstanten Geschwindigkeit von 90 km/h die zulässige Maximalgeschwindigkeit um mindestens 30 km/h. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass der Eco Pro+ Modus des BMW i3 die Geschwindigkeit des Fahrzeugs auf 90 km/h limitiert, kann dem Fahrer dem zur Folge eine energiebewusste Fahrweise attestiert werden. Dieses Fahrverhalten kann z.B. durch ein ausgeprägtes Umweltbewusstsein oder durch den Einfluss von Reichweitenangst begründet sein.

Die nachfolgend dargestellte Fahrt eines Plug-In-Hybrids-Fahrers weist dagegen eine deutliche höhere Dynamik auf.

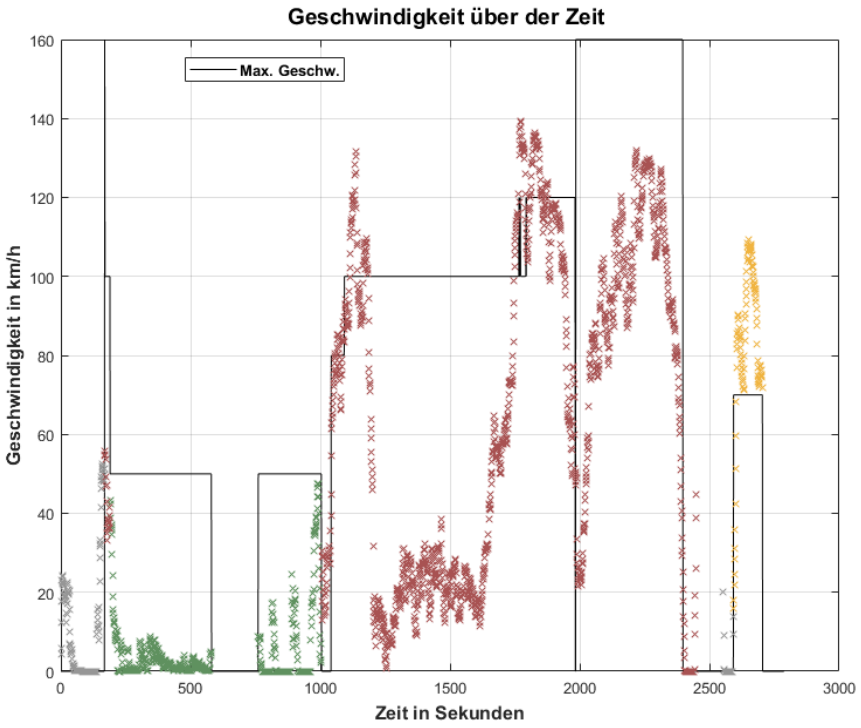


Abbildung 169: Fahrprofil eines PHEV-Fahrzeugs auf unterschiedlichen Straßentypen

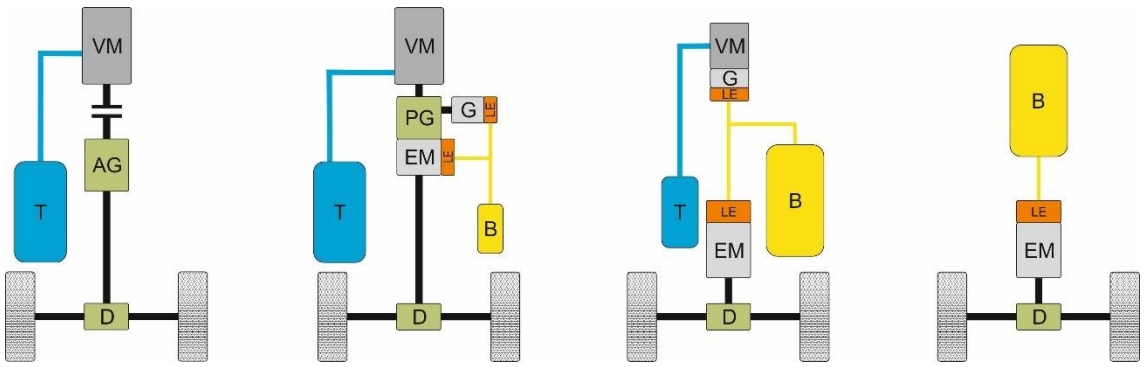
Zu Beginn der Fahrt befindet sich das Fahrzeug ebenfalls im städtischen Umfeld und wechselt im Anschluss auf eine Autobahn. Auf dieser verweilt der PHEV für etwa 1.500 Sekunden, um dann zum Abschluss über eine Landstraße die Fahrt zu beenden. Anhand des Geschwindigkeitseinbruchs im Zeitintervall zwischen ungefähr 1.200 sec und 1.600 sec kann das Auftreten eines Staus erkannt werden. Auffällig bei dieser Fahrt ist, dass der Fahrer wiederholt die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der aktuell befahrenen Straße überschreitet, wie etwa zu den Zeitpunkten bei ca. 1.100 und 1.800 Sekunden auf der Autobahn sowie bei etwa 2.600 Sekunden auf der Landstraße. Die gefahrene Geschwindigkeit übersteigt die erlaubte Grenze um bis zu 40 km/h. Dabei erreicht der Plug-In-Hybrid eine Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h. Im Gegensatz zum zuvor aufgezeigten Fahrprofil des REX-Fahrers kann demnach diesem Fahrer ein deutlich dynamischeres und energieaufwändigeres Fahrverhalten als dessen des Fahrers des Range Extenders attestiert werden.

Durch die exemplarisch veranschaulichten Ergebnisse des Map-Matchings wird bereits das Potential dieser Analysemethode sichtbar. Mit der exakten Kenntnis der Straßentypzuordnung können im Vergleich mit dem zurückgelegten Geschwindigkeitsprofil zukünftig charakteristische Fahrertypen ermittelt werden. Ebenso gewährt diese Methode die Möglichkeit repräsentative Fahrzyklen auf Basis realer Fahrdaten für unterschiedliche Streckenbereiche, wie einer Stadt-, Land- und Autobahnfahrt, zu generieren.

3.1.34 AP 6500 Aufbau von Modellen zum Monitoring von Fahrzeugen, die nicht vollständig messtechnisch ausgestattet sind, um den Einsatz von Messtechnik auf das notwenige Maß zu beschränken

Das Ziel des AP 6500 stellte die Erweiterung der aufgenommenen Fahrdaten um diejenigen Messgrößen dar, die nicht vollständig messtechnisch aufgezeichnet werden konnten. Damit bestand die Möglichkeit, die eingesetzte Messtechnik auf das notwendige Maß zu beschränken. Anhand einer simulationsgestützten Bewertung der real stattgefundenen Fahrten können Prognosen zum effektiven Energiebedarf und ausgestoßenen Emissionen während der Fahrt geschaffen werden. Die Bilanzierung der Emissionen kann dabei ausgehend von unterschiedlich detaillierten Wirkketten, wie der Tank-to-Wheel- oder Well-to-Wheel-Betrachtung, erfolgen. Als wesentliche Grundlage für die Generierung zusätzlicher Kennwerte werden aussagefähige Simulationsmodelle von gängigen Antriebssträngen benötigt. Dazu zählen beispielsweise die Simulationsmodelle von seriellen und parallelen Hybridfahrzeugen, Elektrofahrzeugen sowie von verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen.

Im Zuge dieses Arbeitspakets wurden die zuvor aufgeführten Antriebstopologien in Form von MATLAB bzw. MATLAB/Simulink-Modellen aufgebaut. Der genaue Aufbau des jeweiligen Antriebsstrangs ist in Abbildung 170 schematisch aufgezeigt.



VM: Verbrennungsmotor T: Tank G: Getriebe
PG: Planetengetriebe AG: Automatikgetriebe D: Differential
U: Umrichter K: Kupplung EM: Elektromotor
GE: Generator B: Batteriesystem REX: Range-Extender
DC/DC: Spannungswandler AUX: Nebenverbraucher HV: HV-Verbraucher
LV:12V-Verbraucher mech: mechanische Verbraucher

Abbildung 170: Antriebsstränge, die im Simulationsmodell berücksichtigt werden (in Anlehnung an Koppers)

Die Grundstruktur aller Simulationsmodelle stellt ein Fahrermodell sowie ein Rad- und Längsdynamikmodell dar. Diese wird um ein fundiertes Simulationsmodell des jeweiligen Antriebsstrangs erweitert. Der genaue Ablauf der vorwärts gerichteten simulationsgestützten Berechnung ist in Abbildung 171 aufgezeigt.

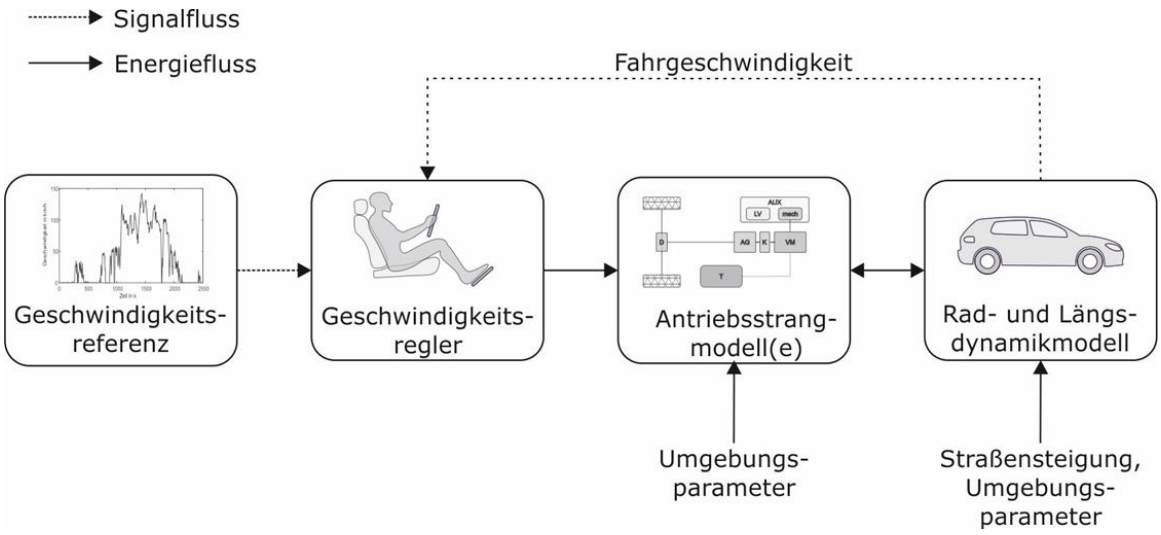


Abbildung 171: Schematischer Ablauf der simulationsgestützten Berechnung (Koppers)

Als Systemeingang wird ein beliebiges Geschwindigkeitsprofil verwendet. Dieses kann z.B. aus einem bestehenden Fahrzyklus, wie dem Neuen Europäischen Fahrzyklen (NEFZ), oder aus den Messungen der Datenlogger entnommen werden. Die vorgegebene Sollgeschwindigkeit wird anschließend durch ein Fahrermodell bzw. Geschwindigkeitsregler mit der derzeitigen Ist-Geschwindigkeit verglichen. Der Geschwindigkeitsregler entspricht einem PI-Regler, der ausgehend von einer Abweichung zwischen dem Soll- und Istwert eine Ausgangsgröße, die auf das System wirkt, bildet. Als Ausgangsgröße tritt die Gas- bzw. Bremspedalstellung in Prozent auf, wobei eine Logik dafür sorgt, dass ausschließlich eine dieser beiden Größen dem Antriebsstrangmodell als Eingangsgröße übergeben wird.

Die vorgegebene Gas- bzw. Bremspedalstellung bewirkt im Antriebsstrangmodell, ähnlich den Vorgängen in einem realen Fahrzeug, eine Steigerung bzw. Reduzierung der Antriebsleistung. Durch quasistationäre Kennfelder werden auf Grundlage der Pedalstellung und aktuellen Drehzahl des Antriebsaggregats ein maximal erreichbares Drehmoment und ein Wirkungsgrad bestimmt. Das Drehmoment wird durch die prozentuale Stellung des Pedals gewichtet, so dass z.B. eine Gaspedalstellung von 50% in dem halben maximalen Drehmoment im Arbeitspunkt des Motors resultiert. Die effektive Antriebsleistung auf die Antriebsräder reduziert sich im Antriebsstrangmodell weiterhin z.B. um die Wirkungsgrade der Getriebe, so dass der Ausgang des Antriebsstrangmodells das Antriebsmoment an den Rädern darstellt. Der Ausgang des Antriebsstrangmodells entspricht gleichwohl dem Eingang des Rad- und Längsdynamikmodells. In diesem erfolgt eine Bilanz der effektiven Fahrwiderstände im derzeitigen Fahrzustand. Dazu zählen der Luft-, Steigungs-, Roll- und Beschleunigungswiderstand. Um den Fahrerwunsch zu entsprechen und die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Soll- und Ist-Geschwindigkeit zu reduzieren, wird ausgehend von

dem Antriebsmoment eine wirkende Antriebskraft an den Rädern berechnet. Diese wird abschließend mit den wirkenden Fahrwiderständen bilanziert, so dass als Systemausgang des Submodells der Rad- und Längsdynamik eine Aktualisierung der Fahrzeuggeschwindigkeit anliegt. Der für diese Veränderung notwendige Energiebedarf wird zusätzlich im zuvor angesprochenen Antriebsstrangmodell bestimmt. Anhand des ermittelten Wirkungsgrads des Motors im derzeitigen Arbeitspunkt kann aus der mechanischen Leistung des Motors, die sich aus der Kombination von Drehzahl und Antriebsmoment bestimmen lässt, auf den Energiebedarf geschlossen werden. Dieser Energiebedarf wird abhängig davon welcher Antriebsstrang ausgewählt ist, durch den Treibstoff im Tank, die elektrische Energie der Traktionsbatterie oder aber durch beide Energieträger gedeckt. Neben dem Energiebedarf des Antriebsaggregats wird zusätzlich ein konstanter Verbrauch von Nebenaggregaten von etwa 400 Watt berücksichtigt. Um bestimmen zu können, wann der benötigte Energiebedarf nicht mehr durch die Energiespeicher gedeckt wird, wird z.B. ein innenwiderstandsbasiertes Batteriemodell verwendet.

Die Ergebnisse der Simulationsmodelle wurden u.a. anhand eines Vergleichs mit bestehenden Herstellergaben des Energiebedarfs aus dem Neuen Europäischen Fahrzyklus verglichen. Dazu wird das Simulationsmodell durch eine Anpassung der Modellparameter auf die abzubildenden Fahrzeugmodelle angepasst. In Tabelle 82 sind die Abweichungen für einen BMW i3 mit einer Kapazität der Traktionsbatterie von 60 Ah, einem BMW 1er Diesel sowie einem VW eGolf aufgeführt.[87] [88] [89]

Tabelle 82: Validierung des Simulationsmodells mit Verbrauchsangaben aus dem NEFZ

Fahrzeug	**Verbrauch NEFZ**	**Verbrauch Simulation**
BMW i3 60 Ah	12,9 kWh / 100 km	13 kWh / 100 km
BMW 1er Diesel	4,4 l / 100 km	4,7 l / 100 km
VW eGolf	12,7 kWh / 100 km	14,1 kWh / 100 km

Aus dem Vergleich der Verbrauchsangaben aus dem synthetischen Fahrzyklus und aus der Simulation wird deutlich, dass diese maximal zu 11% voneinander abweichen. Durch eine Analyse des gesamtheitlichen Nutzungsprofils eines Fahrers können mit Hilfe der Simulationsergebnisse wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. Neben einer Aussage, ob eine ausgewählte Antriebstopologie für das Fahrverhalten

[87] Vgl. BMW Group (2016), S. 50

[88] Vgl. BMW Group (2010), S.2

[89] Vgl. Volkswagen AG (2015), S. 2

des Nutzers geeignet ist, können auch Einflussfaktoren, wie die Ladeinfrastruktur oder die installierte Traktionsbatteriegröße bewertet werden. Dabei können z.B. Erkenntnisse darüber erzielt werden, ob ein höherer Energiegehalt der Batterie durch den Einfluss ihrer steigenden Masse eine positive Auswirkung auf die Reichweite und den Energiebedarf aufweist. Dazu wird neben den aufgezeichneten Fahrdaten auch die effektive Standzeit zwischen Fahrten ausgewertet und als Ladezeit betrachtet. Dementsprechend finden auch zwischen den Fahrten dynamische Vorgänge, wie z.B. das Ansteigen des Ladezustands der Traktionsbatterie, statt.

3.1.35 AP 6600 Simulationsgestützte Auswertung der gesamten Projektflotte zur Verbreiterung der Datenbasis

Im Zuge des Arbeitspakets 6600 wurde das in Abschnitt 3.1.34 beschriebene Modell für eine simulationsgestützte Auswertung einer beliebigen Fahrzeugflotte verwendet. Dazu wurde eine Schnittstelle entwickelt, mit der das Simulationsmodell die aufgenommenen Fahrprofile der Flottenfahrzeuge bewerten kann. Dabei kann die aufgezeichnete Datenbasis z.B. um simulationsgestützte Berechnungen des Kraftstoffbedarfs, der elektrischen Reichweite, des Emissionsausstoßes sowie der Kilometerkosten erweitert werden. Neben einer Simulation des im Projektfahrzeug verwendeten Antriebsstrangs, kann weiterhin auch eine Betrachtung von Potentialen anderer Fahrzeugtypen für das aufgezeichnete Fahrprofil angestellt werden. Somit besteht die Möglichkeit, für eine Fahrzeugflotte die Kombination unterschiedlicher Fahrzeugtypen virtuell zu erproben und eine optimale Flottenkonstellation auf Basis der realen Fahrprofile abzuleiten. Es gilt jedoch zu beachten, dass sich z.B. der Kraftstoffbedarf bei einem elektrifizierten Fahrzeug mit Range-Extender bei einer angenommenen konstanten Betriebsstrategie einstellt. Für den Fall, dass wie z.B. in Abschnitt 3.1.33 gezeigt, ein Fahrer den Range-Extender manuell zuschaltet, können keine belastbaren Simulationsergebnisse erzeugt werden. Neben der Auswertung des Fahrprofils können weiterhin auch unterschiedliche Ladeszenarien und Rahmenbedingungen untersucht werden. Zu diesen zählt unter anderem eine Variation der Größe der Traktionsbatterie.

Eine solche simulationsgestützte Analyse verschiedener (teil-)elektrifizierter Antriebsvarianten (BEV, PHEV, REX, ICEV) auf Basis der aufgezeichneten realen Fahrdaten bei unterschiedlich angenommenen Szenarien wird nachfolgend präsentiert.[90] Da eine Auswertung der simulationsgestützten Berechnungen der Gesamtflotte von 196 Fahrzeugen im Detail nicht übersichtlich gestaltet werden kann, wird eine detaillierte Diskussion exemplarisch an einzelnen Projektfahrzeugen durchgeführt. Dazu werden die Fahrprofile zweier Projektfahrzeuge verwendet. Zum Ende dieses Abschnittes werden beispielhaft charakteristische Kennwerte der simulationsgestützten Verbreiterung der Datenbasis aller Flottenfahrzeuge präsentiert. Anhand eines Längsdynamikmodells wird z.B. die Bedeutung von Einflussfaktoren wie Ladeinf-

[90] Weitere Informationen können Koppers et al. (2017) entnommen werden.

rastruktur oder Traktionsbatteriegröße für den Kraftstoffbedarf, die Energiekosten, die elektrische Fahrtstrecke sowie die Treibhausgas-Emissionen des real zugrundeliegenden Fahrprofils untersucht. Diese Analyse kann auf eine beliebige Flottenzusammensetzung skaliert werden.

Wie zuvor in Abschnitt 3.1.34 erwähnt, werden ebenfalls dynamische Vorgänge in den Zeitintervallen zwischen den eigentlichen Fahrten sowie der Einfluss der Batteriegröße bewertet. Bezüglich der Variation der Ladeinfrastruktur werden dazu vier unterschiedliche Ladeszenarien angenommen. Diese beinhalten sowohl Szenarien, in der der Fahrer sein Fahrzeug nach jeder Fahrt mit Energie versorgen kann, als auch Variationen, in der der Fahrer lediglich an seiner Basisstation aufladen kann. Ebenso werden verschiedene Energiemengen für batterieelektrische Fahrzeuge mit Range-Extender und Plug-In-Hybride angenommen. Diese umfassen entweder 8 kWh, 14 kWh oder 20 kWh. Der Energiegehalt der Traktionsbatterie eines rein batterieelektrischen Fahrzeugs wird mit 24 kWh festgelegt.

In Tabelle 83 und Tabelle 84 sind die als Rahmenbedingungen angenommenen Ladeszenarien bzw. Traktionsbatteriegrößen beispielhaft aufgeführt.

Tabelle 83: Angenommene Ladeszenarien

Szenario	Bedeutung
P7	Mode 3-Ladung; 7 kW Ladeleistung; Lademöglichkeit nach jeder Fahrt
B7	Mode 3-Ladung; 7 kW Ladeleistung; Lademöglichkeit nur an Basisstation
B33	Mode 2-Ladung; 3,3 kW Ladeleistung; Ladung an herkömmlicher Steckdose
K	Mode 3-Ladung; 7 kW Ladeleistung bei Lademöglichkeit an Basisstation sowie 3,3 kW Ladeleistung an zwei weiteren Haltepunkten

Tabelle 84: Angenommene Batteriegrößen

Antriebsvariante	Batteriegröße
BEV	24 kWh
PHEV	8 kWh; 14 kWh; 20 kWh
REX	8 kWh; 14 kWh; 20 kWh

Die Basisstation entspricht der statistisch am häufigsten angefahrenen GPS-Position im gesamten Fahrprofil. Alle weiteren verwendeten Haltepunkte, die z.B. im Szenario K verwendet werden, beziehen sich dementsprechend auf die zweite und drittwahrscheinlichste GPS-Position. Der Zusammenhang zwischen dem steigenden Energiegehalt der Traktionsbatterie und deren Gewicht wird durch das Ergebnis einer

Marktanalyse von Batteriegewichten aus dem Jahre 2015 berücksichtigt. Diese zeigte eine annähernde Linearität zwischen beiden Kennwerten.

Um den direkten Vergleich verschiedener Antriebsvarianten für ein bestehendes Fahrprofil zu ermöglichen, wird ein fiktives Fahrzeugmodell der Kompaktklasse eingesetzt, welches mit allen Antriebssträngen ausgestattet werden kann. Hierbei wird zusätzlich die Annahme getroffen, dass sowohl die äußeren Abmessungen des Fahrzeugs als auch dessen Innenraum unabhängig vom gewählten Antriebsstrang identisch sind.

Nachfolgend werden die Simulationsergebnisse schematisch für zwei aufgezeichnete Fahrprofile, im Folgenden Fahrer A und Fahrer B genannt, dargestellt. Beide Fahrer weisen eine unterschiedliche Nutzung ihrer Fahrzeuge auf. Während Nutzer A ausschließlich 10 % der gesamten Fahrleistung durch Tagesfahrleistungen von über 65 km bewältigte, erreicht Nutzer B bei identischer Analyse mit rund 160 km deutlich höhere Tagesfahrleistungen. Die charakteristischen Kennwerte beider Nutzerprofile sind in Tabelle 85 veranschaulicht.

Tabelle 85: Kennwerte der Nutzerprofile (Koppers et al. (2017))

Kennwert	Fahrer A	Fahrer B
Anzahl Fahrten	502	315
Distanz in km	4.586,7	11.283,8
Dauer in h	112,9	157,6
Fahrtstreckenanteile[91]		
-innerorts	35 %	6,8 %
-außerorts (ohne BAB)	12,7 %	8,4 %
-Autobahn	42,4 %	76,9 %

Fahrer A	Basisstation	Kombination
Anzahl Stopps	20,5%	32,3%
Haltedauer	9,5%	30,2%
Fahrer B	**Basisstation**	**Kombination**
Anzahl Stopps	19,4%	28,6%
Haltedauer	8,2%	13,5%

[91] Die Differenz zu 100% stellen nicht klassifizierbare Fahrtstreckenanteile dar.

Es lässt sich erkennen, dass Fahrer B im Gegensatz zu Fahrer A durchweg längere Strecken mit höheren Geschwindigkeiten zurücklegt, wobei diese mehrheitlich auf Autobahnen stattfanden. Fahrer A kann dagegen, wie auch aus der Darstellung der Durchschnittsbeschleunigungen über der Durchschnittsgeschwindigkeit in Abbildung 172 ersichtlich wird, eine vorausschauende Fahrweise attestiert werden. Er neigt dazu, bei steigender Durchschnittsgeschwindigkeit mit reduzierter Beschleunigung sowie tendenziell mit geringerer Geschwindigkeit zu fahren. Als weiterer Bewertungsmaßstab sind die Kennwerte von Fahrzyklen in der angesprochenen Abbildung aufgetragen.

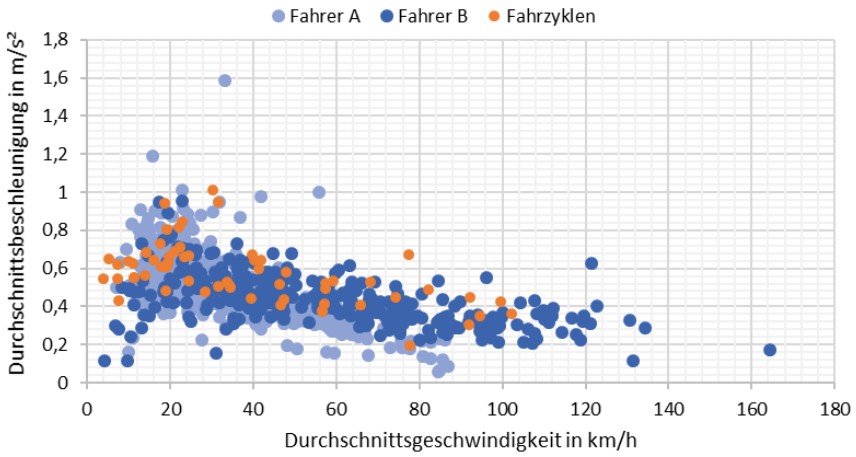


Abbildung 172: Durchschnittliche Beschleunigung über Durchschnittsgeschwindigkeit (Koppers et al. (2017))

Aufgrund der zuvor genannten Differenzen zwischen beiden Fahrprofilen weisen die Ergebnisse der auf Simulationen gestützten Analyse Unterschiede auf. Nachfolgend werden in Tabelle 86 die mit einem batterieelektrischen Fahrzeug zurücklegbaren Fahrtstreckenanteile beider Fahrprofile bei den unterschiedlichen Ladeszenarien zusammengefasst.

Tabelle 86: Fahrbarer Fahrtstreckenanteil des BEV (Koppers et al. (2017))

Ladeszenario	Fahrer A	Fahrer B
P7	96%	65%
B7	85%	30%
B33	81%	26%
K	89%	31%

Aus den Simulationsergebnissen folgt, dass eine deutliche Abhängigkeit zwischen der Ladeinfrastruktur und der zurücklegbaren Fahrtstrecke der batterieelektrischen Fahrzeuge besteht. Wie anzunehmen war, gewährt dabei das als ideal anzusehende Ladeszenario P7 die größten Reichweiten. Auffällig ist jedoch,

dass der Unterschied zwischen diesem optimalen Ladeszenario und dem Ladeszenario K, bei dem ausschließlich bei der Basisstation und zwei weiteren Positionen geladen werden konnte, für Fahrer A lediglich 7% beträgt. Generell ergeben sich bei Fahrer A geringere Differenzen zwischen den unterschiedlichen Ladeszenarien. Ein ähnliches Ergebnis kann auch bei Fahrer B beobachtet werden, wobei die Diskrepanz zwischen dem idealen Ladeszenario P7 und den übrigen Ladevarianten deutlich ausgeprägter ist, als bei Fahrer A. Dies deutet darauf hin, dass Fahrer B, z.B. aufgrund berufsbedingter Fahrten, seine Basisstation im Gegensatz zu Fahrer A nur selten erreicht. Ebenso kann aus den Kennwerten der Nutzerprofile abgeleitet werden, dass Fahrer B längere Einzelstrecken als Fahrer A zurücklegt. Daraus folgt, dass er einen höheren Energiebedarf zur Absolvierung der Fahrstrecke benötigt und tendenziell weniger häufig eine Lademöglichkeit erreicht. Allgemein kann anhand des Vergleichs der Ladeszenarien B33 und B7 erkannt werden, dass das Vorhandensein eines Ladepunktes eher als die effektive Ladeleistung entscheidend ist. Dem liegt zu Grunde, dass die effektive Zeit, die z.B. an der Basisstation für eine Ladung der Traktionsbatterie zur Verfügung steht, selbst bei einer geringen Ladeleistung von 3,3 kW ausreicht, um die Batterie vollzuladen. Daher wirkt sich die zusätzlich vorhandene Ladeleistung lediglich bei kurzen Halten an der Home-Position aus.

Weiterhin können die Auswirkungen der Ladeszenarien und der Energie der installierten Batteriesysteme auf weitere Kennwerte, die simulationsgestützt berechnet werden, betrachtet werden. Dabei werden der Kraftstoffbedarf, die THG-Emission sowie die Energiekosten relativ zu denen eines konventionellen Fahrzeugs angegeben. Die relative elektrische Fahrtstrecke bezieht sich auf den Anteil an der insgesamt gefahrenen Strecke der jeweiligen Fahrzeugauslegung bei dem jeweiligen Ladeszenario.

Abbildung 173 und Abbildung 174 beinhalten die Gegenüberstellungen des zuvor erwähnten relativen Kraftstoffbedarfs bezügliches eines konventionellen Verbrenners über der relativ zurückgelegten elektrischen Fahrtstrecke. Dabei wird in Abbildung 173**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** das Ergebnis für Fahrer A und in Abbildung 174 das Resultat für Fahrer B aufgetragen. Alle relativen Reichweiten der verschiedenen Antriebsstränge werden auf die maximal erreichte elektrische Reichweite im jeweiligen Ladeszenario bezogen. Dementsprechend gilt, dass die Datenpunkte, die sehr nahe an der Reichweite des BEV liegen, das ideale Ladeszenario P7 beschreiben. Am weitesten entfernt von der höchstmöglichen elektrischen Reichweite ist jeweils die Ladevariante B33 aufzufinden.

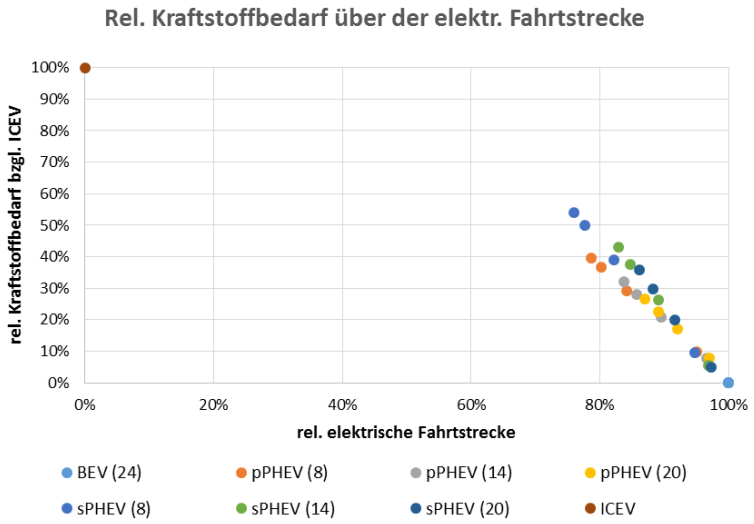


Abbildung 173: Vergleich Kraftstoffbedarf vs. elektr. Fahrtstrecke für Fahrer A (Koppers et al. (2017))

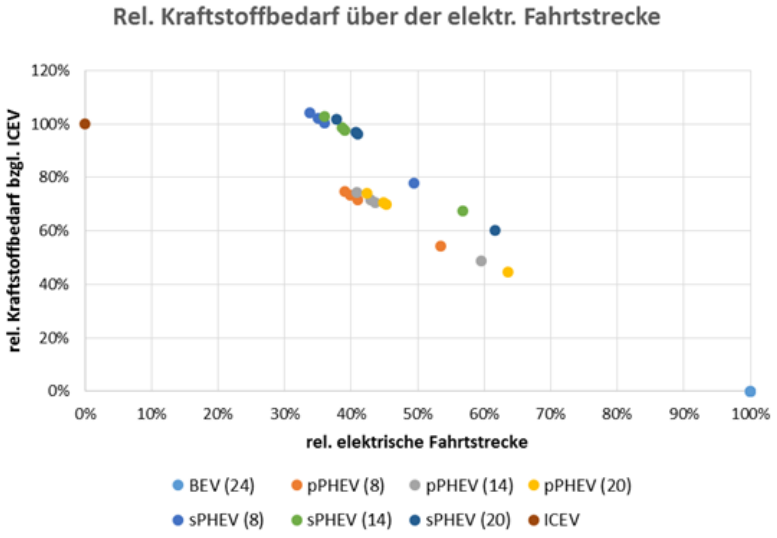


Abbildung 174: Vergleich Kraftstoffbedarf vs. elektr. Fahrtstrecke für Fahrer B (Koppers et al. (2017))

Die vorausschauende Fahrweise von Fahrer A erlaubt es ihm, annähernd in jedem Lade- und Batterieszenario eine relative elektrische Reichweite von über 80% zu erreichen. Dadurch reduziert sich der Kraftstoffverbrauch, den Fahrer A für sein Fahrprofil mit einem hybriden Fahrzeug aufbringen, um bis zu 60% bezüglich dessen eines konventionellen Verbrenners. Bei Annahme der größten Batteriegröße in Kombination mit dem idealen Ladeszenario P7 können sogar Kraftstoffeinsparungen von bis zu 95% mit einem seriellen Hybrid erreicht werden.

Fahrer B weist dagegen aufgrund seines deutlich dynamischeren Fahrprofils einen grundsätzlich höheren Energiebedarf auf. Dieser resultiert in geringeren relativen elektrischen Fahrtstreckenanteilen als Fahrer A. Bei Annahme eines seriellen Hybrides mit geringer Batteriegröße ergeben sich sogar Kraftstoffverbräuche, die über denen eines konventionellen Verbrenners liegen, obwohl das Fahrzeug elektrische Fahrtstreckenanteile aufweist. Ein solcher Effekt kann in erster Linie auf die doppelte Wirkungsgradwandlung bei einem seriellen Hybrid zurückgeführt werden. Bedingt durch die Tatsache, dass ausschließlich 40% der Strecke rein elektrisch absolviert worden sind, folgen demnach 60% der Strecke bei einem ungünstigen Gesamtwirkungsgrad. Ebenso besitzt das Fahrzeug bedingt durch die Traktionsbatterie, Leistungselektronik und elektrische Antriebsaggregate eine erhöhte Fahrzeugmasse gegenüber der eines konventionellen Verbrenners.

Grundsätzlich besteht erwartungsgemäß eine starke Abhängigkeit zwischen dem relativen Kraftstoffbedarf der Hybride bezüglich eines konventionellen Verbrenners und der erzielbaren elektrischen Fahrtstrecke. Gleichermaßen haben die installierte Batteriegröße sowie das Ladeszenario Einfluss auf den Kraftstoffbedarf, da häufigeres Laden und eine größere Batteriegröße die elektrisch zurücklegbaren Fahrtstreckenanteile ausdehnt.

Neben einer Bewertung des relativen Kraftstoffbedarfs bezüglich eines konventionellen Fahrzeugs werden die Antriebskonzepte z.B. auf Basis der realen Fahrprofile hinsichtlich ihrer Gesamtenergiekosten und Treibhausgas-Emissionen analysiert. Zur Ermittlung der Treibhausgas-Emission wird neben dem Ausstoß während der Fahrt auch die Energiebereitstellung in der Vorkette mit bilanziert. Dazu werden die in Tabelle 87 aufgeführten Treibhausgas-Emissionsfaktoren angewendet.[92] [93]

Tabelle 87: Angenommene THG-Emissionen für verschiedene Energieträger

Energieträger	Vorkette	Betrieb
Ottokraftstoff (E5)	0,5 kg/l	2,3 kg/l
Strommix D	593 g/kWh	0 g/kWh
Ökostrommix D	136 g/kWh	0 g/kWh

Die Energiekosten setzen sich zusammen aus den Kraftstoff- und Stromkosten zum Nachladen der Traktionsbatterie. Zur Quantifizierung der Kosten werden 1,40 € pro Liter Ottokraftstoff und 0,30 € pro Kilowattstunde elektrischer Energie angenommen.

[92] Vgl. Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. (2013), S. 28

[93] Vgl. Ford-Werke GmbH (2016), S. 91

Die Gegenüberstellung dieser Kennwerte wird in Abbildung 175 und Abbildung 176 ebenfalls in Relation zu den Resultaten eines konventionellen Kraftfahrzeugs vorgestellt, wobei ausschließlich die Darstellung der THG-Emissionen im Ökostrommix präsentiert wird. In der Darstellung wird die Treibhausgas-Emission bezüglich eines konventionellen Fahrzeugs über den relativen Energiekosten bezüglich eines konventionellen Fahrzeugs aufgetragen.

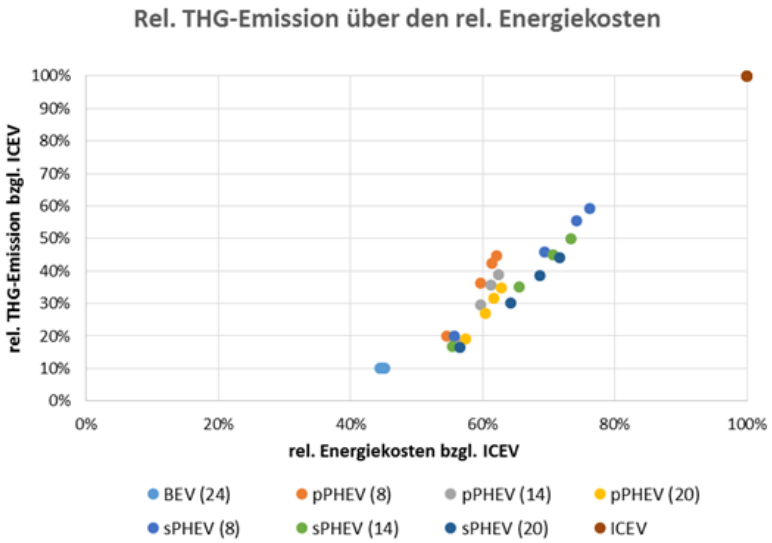


Abbildung 175: THG-Emission vs. Energiekosten bezüglich eines ICEV für Fahrer A (Koppers et al. (2017))

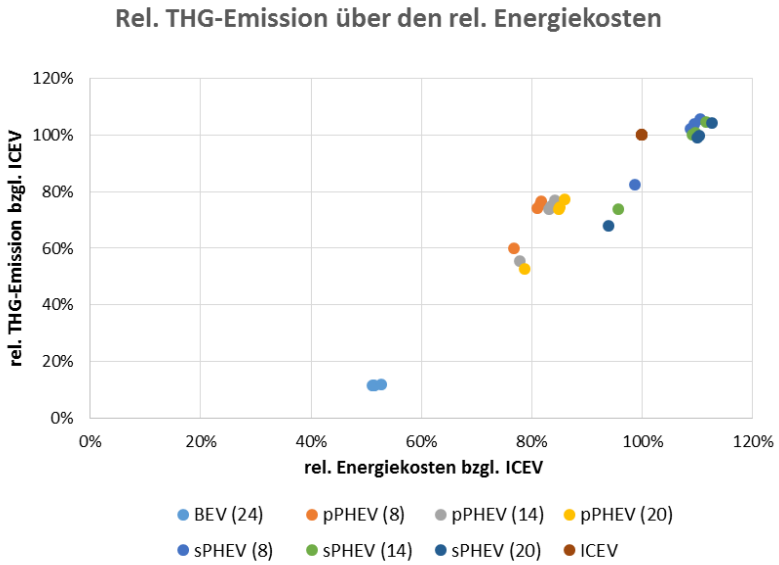


Abbildung 176: THG-Emission vs. Energiekosten bezüglich eines ICEV für Fahrer B (Koppers et al. (2017))

Wie bei den Simulationsergebnissen zuvor (vgl. Abbildung 173**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und Abbildung 174), lässt sich eine starke Abhängigkeit zwischen den THG-Emissionen bzw. den Energiekosten der betrachteten Antriebsvarianten und der rein elektrisch gefahrenen Fahrtstrecke erkennen. Mit zunehmender anteiliger rein elektrischer Fahrtstrecke sinkt die Menge an ausgestoßenen THG-Emission in der Tank-to-Wheel-Betrachtung. Ebenso verringert sich der Bedarf an Kraftstoff. Die elektrische Fahrtstrecke wird wiederum von dem Energiegehalt der Batterie, der Ladeinfrastruktur sowie dem Fahrerverhalten signifikant beeinflusst.

Aufgrund des verbrauchsbewussten Fahrverhalten von Fahrer A können dabei Einsparungen der THG-Emissionen um bis zu 80% bei Reduzierung der Energiekosten um mehr als 40% bei der Kombination eines seriellen Hybrids mit großer Traktionsbatterien bei einem optimalen Ladeszenario erreicht werden. Unter der Annahme realistischer Lademöglichkeiten, wie, dass z.B. lediglich an einer Basisstation geladen werden kann, können beispielsweise für das Fahrprofil von Fahrer A bis zu 60% THG-Emission bei bis zu 40% Energiekosten eingespart werden. Dagegen besteht, wie die Ergebnisse des Fahrprofils von Fahrer B aufzeigen, die Möglichkeit, dass die THG-Emissionen und Energiekosten eines Hybriden diejenigen eines konventionellen Fahrzeugs übersteigen. Wie zuvor bei der Betrachtung des Kraftstoffbedarfs spielt auch in diesem Fall die geringe rein elektrisch zurücklegbare Strecke die entscheidende Rolle. Diese wirkt sich bedingt durch das zusätzliche Fahrzeuggewicht und eine doppelte Wirkungsgradwandlung vom Verbrennungsmotor über den Generator und Elektromotor nachteilig auf die THG-Emission und Energiekosten aus. Daraus folgt, dass die Verwendung eines seriellen Hybrids für Fahrer A enorme Einsparpotentiale mit sich führt. Für Fahrer B wäre die Wahl eines seriellen Hybrids dagegen aus den zuvor aufgezeigten Gründen nachteilig. Bei seinem Fahrprofil würde sich die Auswahl eines parallelen Hybrids als effizienter und sinnvoller erweisen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass nicht jede Antriebsstrangvariante bei einem bestehenden Fahrprofil die gewünschten Einsparpotentiale aufweist. Eine Reduzierung des Kraftstoffbedarfs, der THG-Emissionen sowie der Energiekosten im Bezug zu einem konventionellen Fahrzeug ist in erster Linie von der anteilig rein elektrisch zurücklegbaren elektrischen Strecke abhängig. Diese wird durch die vorhandene Ladeinfrastruktur, die Größe der Traktionsbatterie sowie dem Fahrverhalten beeinflusst. Aus den Simulationsergebnissen folgt, dass bei tendenziell hohen elektrisch abdeckbaren Reichweiten die Auswahl eines seriellen Hybrids den höchsten Effekt erzielt. Bei zunehmend sinkender elektrischer Reichweite stellt sich dagegen die Verwendung eines parallelen Hybrids aus den zuvor aufgezeigten Nachteilen eines seriellen Hybrids als geeigneter dar.

Das konzipierte Simulationsmodell bietet die Möglichkeit, reale Fahrprofile unter der Annahme unterschiedlicher Hypothesen miteinander zu vergleichen. In diesen Hypothesen kann z.B. die reale Ladeinfrastruktur eines Nutzers abgebildet werden, so dass abschließend für die aufgezeichneten Fahrten bzw. das Fahrprofil des Nutzers bei individuell festgelegten Kriterien die optimale Antriebsvariante ausgewählt werden kann. Dieses Schema kann auf die Gesamtheit einer Fahrzeugflotte ausgedehnt bzw. skaliert werden. Folglich ist es damit möglich, die aufgezeigte Bewertung in eine Flottenoptimierung, auf die in

Abschnitt 3.1.38 eingegangen wird, einfließen zu lassen. Dabei können Rahmenbedingungen und Gewichtungen von Kennwerten durch den Fuhrparkleiter festgelegt werden, so dass die optimale Fahrzeugkombination zur Einhaltung dieser Vorgaben bestimmt werden kann. Da wie eingangs erwähnt, eine detaillierte simulationsgestützte Auswertung der gesamten Projektflotte schwierig dargestellt werden kann, werden nachfolgend berechnete charakteristische Kennwerte der Gesamtflotte aufgeführt. Diese charakteristischen Kennwerte entsprechen jeweils den durchschnittlichen Kenngrößen der jeweiligen Fahrprofile der Projektfahrzeuge. Weil der Großteil der Fahrzeuge, die im Projekt vermessen wurden, vom Typ BEV mit und ohne Range-Extender sind, wurden deren Antriebsstrangmodelle für die Simulation verwendet. Dementsprechend wird jedes aufgezeichnete Fahrprofil sowohl als rein batterieelektrisches Fahrzeug als auch als Elektrofahrzeug mit Range-Extender simuliert. Zusätzlich werden die Simulationsergebnisse für ein vergleichbares konventionelles Fahrzeug mit Dieselmotor als Referenzwert aufgetragen. Um unterschiedliche Nutzungsszenarien zu bewerten, werden vier verschiedene Ladeszenarien während der Simulation der Fahrtenhistorie berücksichtigt. Dabei beinhaltet ein Szenario eine vollgeladene Traktionsbatterie zu Fahrtbeginn. Die drei übrigen Ladeszenarien setzen eine identische Ladeleistung von 7,4 kW bei einem batterieseitigen Ladewirkungsgrad von 85% voraus, wobei sich die effektive Ladezeit unterscheidet. In einem Szenario findet nach jeder Fahrt eine Ladung der Traktionsbatterie statt, wohingegen innerhalb der anderen zwei Szenarien ausschließlich über Nacht bzw. ab einer Haltedauer von einer Stunde geladen wird. Es gilt es zu beachten, dass einige dieser Kennwerte, wie z.B. die Einschaltdauer des Range-Extenders, abhängig von der hinterlegten Betriebsstrategie im Simulationsmodell variieren können.[94] In Abbildung 177 werden die relativen Fahranteile, an denen der Range-Extender betrieben wurde, bei Annahme vier verschiedener Ladeszenarien für die Gesamtflotte aufgetragen

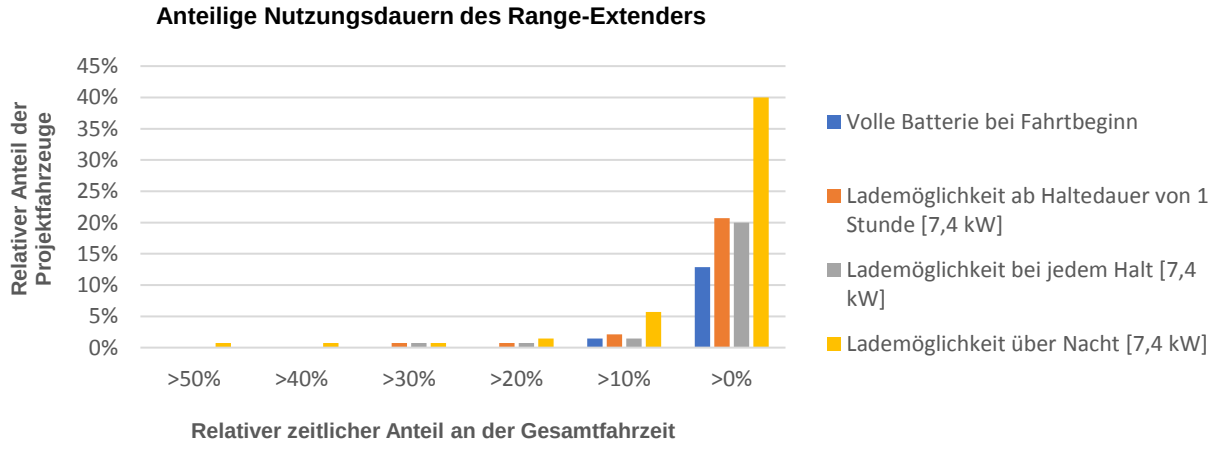


Abbildung 177: Anteilige Nutzungsdauern des Range-Extenders aus Simulation

[94] Die Betriebsstrategie des Range-Extenders im Simulationsmodell umfasst zwei Betriebspunkte des Verbrennungsmotors. Bei 30% SOC wird der Motor im optimalen Betriebspunkt betrieben. Nach Unterschreitung von 20% SOC arbeitet der Motor mit maximaler Leistung.

Aus den dargestellten Simulationsergebnissen wird deutlich, dass, wie zu erwarten war, eine Abhängigkeit zwischen den Häufigkeiten des Ladungsvorgangs und des Range-Extenders Betriebs besteht. Wie sich zeigt, weist ein Ladungsszenario, bei dem ausschließlich über Nacht geladen wird, die höchsten Anteile mit Range-Extender auf. Dabei beinhalten 8,1% der Fahrprofile mehr als 10% der Gesamtfahrzeit mit angeschaltetem REX, wobei mehr als 50% der Fahrprofile bei Annahme dieses Ladeverhaltens komplett rein elektrisch vollzogen werden können. Die übrigen Ladeszenarien gewährleisten einen höheren Ladezustand der Traktionsbatterie zum jeweiligen Fahrtbeginn, so dass größtenteils weniger als 10% der Gesamtfahrzeit der Fahrprofile im Range-Extender-Betrieb stattfindet. Eine vollgeladene Traktionsbatterie zu Fahrtbeginn bewirkt bei ca. 5% bzw. 7% der Fahrprofile der Projektfahrzeuge, dass der REX im Gegensatz zu den Ladeszenarien bei Haltedauer ausgeschaltet bleibt. Aus dem Vergleich der Ergebnisse für die Ladeszenarien mit Einbezug der Haltedauer geht hervor, dass ausschließlich geringe Differenzen auftreten. Demzufolge kann davon ausgegangen werden, dass die Haltedauern, die die Projektfahrzeuge in ihrer Fahrtenhistorie aufweisen, größtenteils länger als eine Stunde andauern.

Weitere charakteristische Kenngrößen, wie der Emissionsausstoß in Gramm pro Kilometer konnten ebenfalls durch die gezielte Simulation unter Hinzunahme der Treibhausgas-Emissionsfaktoren aus Tabelle 87 für verschiedene Ladeszenarien quantifiziert werden. Alle nachfolgenden Kennwerte entsprechen der Simulation bei der realistischen Annahme, dass ausschließlich nachts geladen wird. In Abbildung 178 sind die Emissionsausstöße der simulierten Antriebsmodelle in Form eines Boxplots aufgezeigt. Die dargestellten Emissionen entsprechen einer Well-to-Wheel-Betrachtung bei Beladung mit Ökostrommix bzw. einem Strommix.

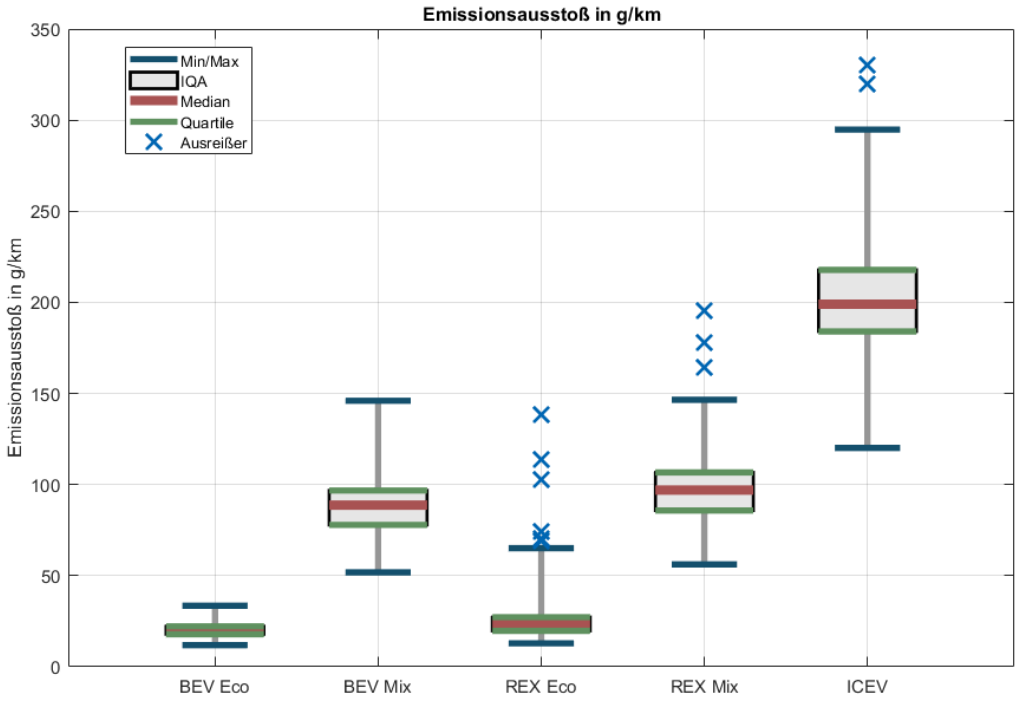


Abbildung 178: Emissionsausstoß in Gramm pro Kilometer für unterschiedliche Fahrzeugmodelle aus Simulation

Die Ergebnisse zeigen, dass elektrifizierte Fahrzeuge im Gegensatz zu einem konventionellen Verbrenner deutlich weniger Emissionsausstoß verursachen. Dieser Sachverhalt ergibt sich zum einen aus der technischen Beschaffenheit der Fahrzeuge, jedoch spielt auch die Fahrweise der Nutzer eine erhebliche Rolle wie die große Differenz zwischen minimalem und maximalem Emissionsausstoß bei einem konventionellen Fahrzeug unterstreicht. Eine unwirtschaftliche Nutzung eines batterieelektrischen Fahrzeugs mit Range-Extender kann, wie der Boxplot des REX vor allem im Strommix offenbart, ähnliche Emissionsausstöße wie ein konventioneller Verbrenner hervorrufen. Bedingt durch die doppelte Wirkungsgradwandlung bei einem Einsatz des Range-Extenders können vergleichbare bis höhere Emissionen als die eines Verbrennerfahrzeugs verursacht werden. Die Auswirkung eines laufenden Range-Extenders kann weiterhin durch den im Gegensatz zu den rein batterieelektrischen Fahrzeugen durchweg leicht erhöhten Emissionsausstoß der Fahrzeuge mit Range-Extender ausgemacht werden. Weitere charakteristische Kenngrößen stellen der Energiebedarf und die Kilometerkosten der simulierten Fahrzeugtypen dar. Beide Kenngrößen sind ebenfalls simulationsgestützt für die Gesamtflotte berechnet worden und werden in Abbildung 179 und Abbildung 180 aufzeigt. Zur Berechnung der Strom- und Treibstoffkosten wurden 0,30 €

pro kWh, 1,15 € pro Liter Diesel- sowie 1,33 € pro Liter Otto-Kraftstoff angenommen.[95] Die Kennwerte der Kraftstoffe, wie der Heizwert und die Dichte, sind der Literatur entnommen.[96]

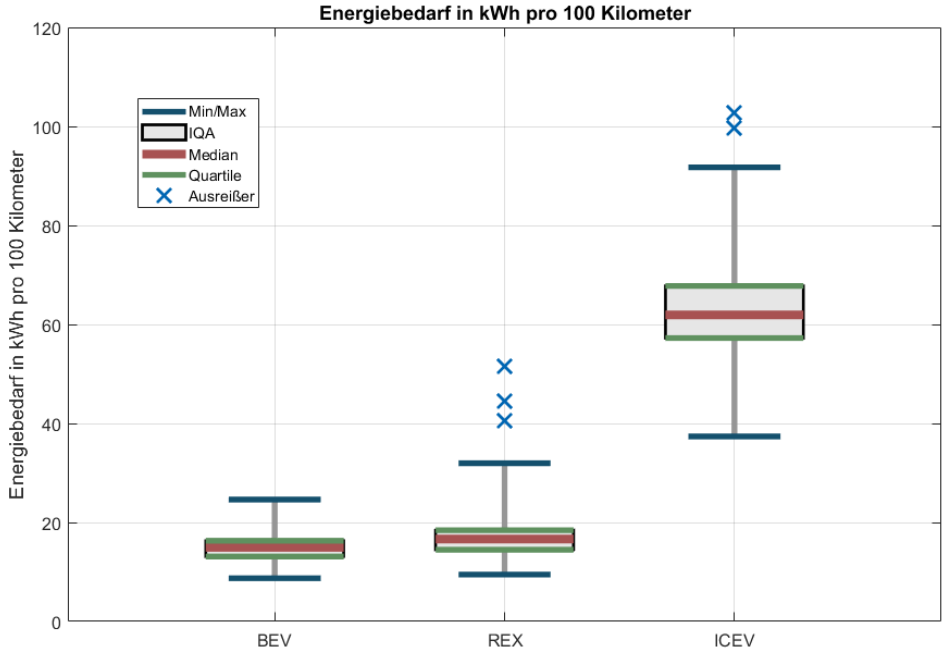


Abbildung 179: Energiebedarf in kWh pro 100 Kilometer aus Simulation

Bedingt durch den geringeren Gesamtwirkungsgrad des konventionellen Verbrennerfahrzeugs weist dieser einen höheren Energiebedarf als ein elektrifiziertes Fahrzeug auf. Des Weiteren ist der Anteil an rotierenden Massen und dementsprechend die zu überwindende Trägheit im Antriebsstrang bei einem Elektrofahrzeug geringer. Beides bewirkt, dass weniger Energie zum Erreichen des Fahrzustandes aufzubringen ist. Dennoch zeigt sich auch bei der Bewertung des Energiebedarfs, dass besonders bei einem Elektrofahrzeug mit Range-Extender abhängig von dem Nutzungsverhalten des Fahrers ein erhöhter Energiebedarf auftreten kann. Diese Tatsache wirkt sich auch auf die Kilometerkosten in Euro pro 100 Kilometer aus, wie die folgende Abbildung veranschaulicht.

[95] Vgl. ADAC Autokosten (2017a), S.2

[96] Vgl. Todsen (2012), S. 71-72, S. 128

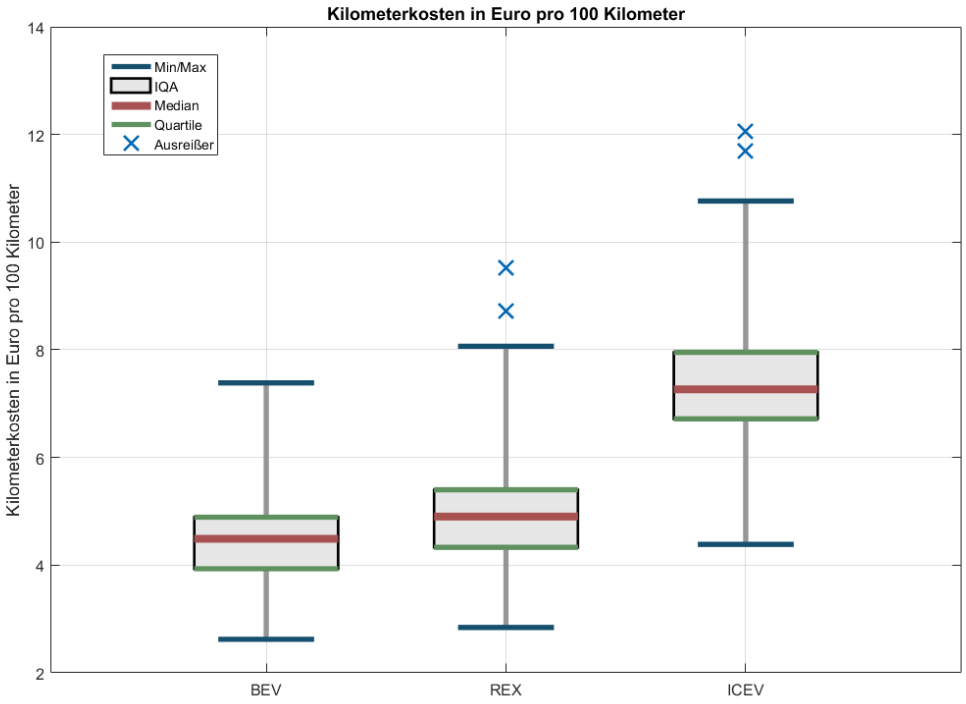


Abbildung 180: Kilometerkosten in Euro pro 100 Kilometer aus Simulation

Es wird ersichtlich, dass die effektiven Kilometerkosten abhängig vom Nutzungsverhalten variieren. Dabei gewähren die elektrifizierten Antriebsmodelle eine Vergünstigung gegenüber einem Verbrennerfahrzeug. Auch in diesem Fall ist eine geringe Erhöhung der Kilometerkosten eines rein batterieelektrischen Fahrzeugs mit Range-Extender gegenüber einem reinen Elektrofahrzeug zu erkennen. Allgemein lässt sich festhalten, dass es in den bisher aufgezeigten Ergebnissen eine klare Abhängigkeit zum Fahrverhalten des Nutzers zu erkennen ist. Demzufolge ist es schwierig, allgemeingültige Aussagen aus einer Betrachtung der simulationsgestützten Berechnungen der Gesamtflotte abzuleiten. Ein sinnvoller Vergleich der simulationsgestützten Datenbasis erscheint in erster Linie nutzerabhängig, wie zuvor in diesem Abschnitt für zwei einzelne Fahrprofile durchgeführt, sinnvoll. Anhand einer nutzerspezifischen Analyse können die Vor- und Nachteile von unterschiedlichen Fahrzeugtypen ermittelt und eine Empfehlung ausgesprochen werden.

3.1.36 AP 8000 Bereitstellung von Werkzeugen zur Ermittlung optimaler Fahrzeugkonzepte für unterschiedliche Nutzergruppen

Die im Arbeitspaket 3.1.35 präsentierte Methode zur systematischen Auswertung realer Fahrprofile kann auf eine beliebige Flottengröße skaliert werden. Dabei kann jedes Fahrverhalten virtuell mit wechselnden Fahrzeugtypen und Umgebungsbedingungen, wie z.B. die Ladeinfrastruktur oder die Batteriegröße, erprobt werden. Als Resultat stehen für die Fahrtenhistorie Kennwerte für unterschiedliche Antriebstopologien und Setups zur Verfügung. Sie umfassen beispielsweise den Kraftstoffbedarf, die elektrische Reichweite sowie die ausgestoßenen Emissionen. Diese Kenngrößen können anschließend hinsichtlich vorgegebener Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen bewertet werden. Ausgehend von Präferenzen und Restriktionen eines Nutzers ist es dadurch möglich, ein für die eigenen Bedürfnisse optimales Fahrzeugkonzept auszuwählen. Übertragen auf einen gesamten Fuhrpark bedeutet dies eine optimale Kombination von Fahrzeugen zur Erfüllung der angedachten Ziele auf Basis von einzuhaltenden Rahmenbedingungen. Diese Rahmenbedingungen umfassen z.B. die Kosten oder den zulässigen Emissionsausstoß eines Gesamtfuhrparks.

In den nachfolgenden Arbeitspaketen werden Konzepte zur Ermittlung einer optimalen Fuhrparkkonstellation auf Grundlage von realen Fahrprofilen präsentiert. Dabei besitzt der Nutzer bzw. Fuhrparkleiter die Möglichkeit gezielte Vorgaben und Wünsche vorzugeben. Das Ergebnis soll eine Kombination von optimalen Fahrzeugkonzepten für unterschiedliche Nutzergruppen unter Einhaltung der festgelegten Rahmenbedingungen darstellen.

3.1.37 AP 8100 Entwicklung eines Werkzeugs zur Ermittlung optimaler Fahrzeugkonfigurationen für unterschiedliche Nutzergruppen

Das Arbeitspaket 8 befasst sich mit der Fragestellung, welche Fahrzeugkonfiguration für unterschiedliche Nutzergruppen bestmöglich geeignet ist. Im Kontext eines Fuhrparks in einem Unternehmen bedeutet dies die optimale Auswahl der Antriebsstrangkonzepte für das spezifische Anwendungsfeld eines Fuhrparks unter Berücksichtigung subjektiv gewählter Bewertungskriterien. Die Bewertungskriterien entstammen beispielsweise einer im Unternehmen geltenden Car Policy und umfassen Vorgaben hinsichtlich einzuhaltender Kosten oder Emissionen. Eine Lösungsalternative, um z.B. die Richtlinien im Hinblick auf ausgestoßene Emissionen der Gesamtflotte einzuhalten, stellen alternative Antriebstechnologien wie rein batterieelektrische Fahrzeuge dar. Oftmals stellt sich hierbei jedoch die Frage, ob die bestehenden Fahrprofile der Fuhrparknutzer mit diesen Antriebsarten gedeckt werden können. Aufgrund von fehlenden Informationen, wie dem spezifischen Nutzungsverhalten, gestaltet sich eine manuelle Bearbeitung dieser Fragestellung als schwierig. Dementsprechend sollte im Zuge dieses Arbeitspakets ein Werkzeug entwickelt werden, welches in der Lage ist, die zuvor aufgezeigten Problemstellungen zu lösen. Dessen Entwicklung ist nachfolgend beschrieben.

Die Grundlage für das Werkzeug zur Ermittlung optimaler Fahrzeugkonfigurationen für unterschiedliche Nutzergruppen stellte ein einfaches Blackbox-Modell dar (vgl. Abbildung 181).

Abbildung 181: Blackbox-Modell der Fuhrpark-Optimierung

Das System „Flotten-Optimierung“ besitzt Eingangsgrößen, welche nach einer Analyse Ausgangsgrößen hervorrufen, die die Lösung des formulierten Problems darstellen. Die Variation an möglichen Eingangsgrößen des Blackbox-Modells ist auf die Messdaten, die für jedes Fahrzeug durch die sensorbasierten Datenlogger aufgezeichnet wurden, beschränkt. Diese beschreiben das nutzerspezifische Fahrverhalten, welches einen besonders wichtigen Einfluss auf die Auswahl eines geeigneten Antriebskonzeptes besitzt. Besonders das Geschwindigkeitsprofil und die durchschnittliche Fahrstrecke definieren die Eignung eines Fahrzeugtyps. Wie zuvor erwähnt, wirken sich neben dem Fahrprofil eines Nutzers auch existierende Rahmenbedingungen auf die Bestimmung einer bestmöglich geeigneten Antriebsvariation aus. Bedingt durch Präferenzen und Restriktionen eines Fahrers wird die Schar an geeigneten Fahrzeugkonfigurationen zusätzlich beschränkt. Zusammenfassend lässt sich daher festhalten, dass sich die Eingangsgrößen des Blackbox-Modells im Wesentlichen aus den Fahrprofilen, den Präferenzen sowie den Restriktionen der Nutzer zusammensetzen. Die Ausgangsgröße des Systems stellt die für den Nutzer optimale Fahrzeugkonfiguration bzw. im Kontext einer Flotte die optimale Konstellation von Fahrzeugen dar. Folglich kann das zuvor als Blackbox-Modell aufgeführte System um die zuvor aufgezeigten Ein- und Ausgangsgrößen erweitert werden Abbildung 182.

Abbildung 182: Fuhrpark-Optimierung mit Ein- und Ausgangsgrößen

Der optimierte Fuhrpark am Ausgang des Systems beschreibt eine Gruppierung unterschiedlicher Antriebstopologien, die im Zusammenschluss die Anforderungen an den Fuhrpark bestmöglich befriedigen. Im Zuge dieses Arbeitspaketes wurden batterieelektrische, hybride sowie konventionelle Fahrzeuge als Lösungsalternativen eingesetzt. Daraus folgt, dass das entwickelte Werkzeug keine exakte Vorgabe für ein Fahrzeugmodell vorgibt, sondern Empfehlungen für eine geeignete Konstellation ausspricht.

Die eigentliche Funktion des Werkzeugs, die Flotten-Optimierung, stellt die Verbindung zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen dar. Diese Verbindung wird mit Hilfe einer mathematischen Beschreibung definiert. Die genaue Bestimmung der optimalen Flottenkonstellation wird dabei als ein mathematisches Optimierungsproblem aufgefasst, in der eine Zielfunktion minimiert bzw. maximiert wird. Die Zielfunktion stellt die mathematische Abbildung der Problemstellung dar. Sie besteht im Wesentlichen aus den gewichteten Kriterien und Vorgaben des Nutzers sowie einem Lösungsraum. Zusammenfassend lässt sich die folgende mathematische Zielfunktion definieren:

$$a(x) + b(x) + c(x) + d(x) + \ldots + z(x) = U(x) \longrightarrow max. \tag{3-39}$$

Das Ergebnis der Zielfunktion, die Variable $U(x)$, kann als Gesamtnutzen des Fuhrparks verstanden werden. Dieser ist abhängig von Einflussfaktoren und einem Lösungsraum x und sollte im optimalen Fall sein globales Maximum aufweisen. Die Faktoren $a(x)$ bis $z(x)$ stellen sogenannte Teilnutzen dar, die von einem Vektor x abhängig sind. Diese Teilnutzer werden im Vorfeld durch den Nutzer anhand der festzulegenden Vorgaben gewichtet. Der Vektor bzw. Lösungsvektor x beschreibt eine Fuhrparkkonstellation, welche durch das Werkzeug bestmöglich an die nutzerspezifischen Vorgaben angepasst wird. Er besitzt die in (3-40) definierten Einträge.

$$x = \begin{bmatrix} x_B \\ x_H \\ x_I \end{bmatrix} \tag{3-40}$$

Diese Einträge stehen für eine variable Anzahl an Fahrzeugen, unterteilt in drei verschiedene Antriebstopologien. Der Index „B“ definiert die Anzahl an rein batterieelektrischen Fahrzeugen im Lösungsvektor. Weiterhin wird durch „H“ und „I“ die Anzahl an hybriden bzw. konventionellen Fahrzeugen im Lösungsvektor abgebildet. Um die Obergrenze der Anzahl an Fahrzeugtypen zu limitieren, wird durch eine simulationsgestützte Berechnung ermittelt, wie viele Fahrzeuge bei Beibehaltung des Nutzungsprofils durch batterieelektrische bzw. hybride Fahrzeuge ersetzt werden könnten. Demzufolge entspricht die Summe aller Einträge des Vektors x der Anzahl an Fahrzeugen im Fuhrpark. Dies stellt beispielsweise eine weitere Einschränkung dar, die durch den Fuhrparkleiter im Vorfeld der Optimierung festgelegt werden muss.

Da eine Abbildung aller denkbaren Nutzervorgaben den zeitlichen Rahmen dieses Arbeitspaketes überschritten hätte, wurden wesentliche Rahmenbedingungen für die Nutzervorgabe im Vorfeld festgelegt.

Zur Schaffung einer geeigneten Entscheidungsgrundlage, wurden in einem Workshop mit dem Lehrstuhl für Allgemeine BWL und Automobilwirtschaft der Universität Duisburg-Essen Kriterien erarbeitet, die in Kombination mit den Ergebnissen der Befragungen und Fahrdatenauswertung eine geeignete Bewertung bzw. Auswahl von Antriebsvarianten und Flottenzusammensetzungen abgeben.

Diese Bewertungskriterien umfassen im Wesentlichen:

1) CO_2-Ausstoß
2) Kosten (Verbrauch, Finanzierungsaspekte)
3) Nutzungsdauer
4) Flexibilität
5) Prestige

Auf Basis dieser Einflussgrößen wurde eine mathematische Grundstruktur in Form eines Software-Werkzeugs-Prototypen konzeptioniert. Die Struktur des Software-Tools ist in Abbildung 183 schematisch dargestellt.

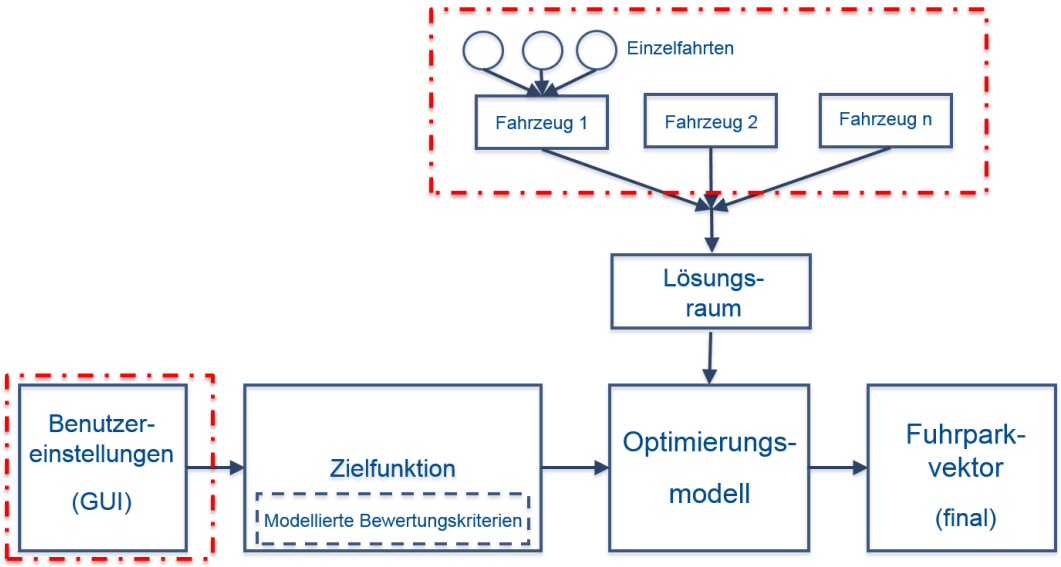


Abbildung 183: Schematischer Ablauf der Flottenoptimierung

Im ersten Schritt wird zunächst aus einer simulationsgestützten Bewertung der Fahrdaten der Fahrzeuge ermittelt, wie viele Fahrprofile potentiell auch rein batterieelektrisch bzw. hybrid umgesetzt werden könnten. Dazu wird das in Abschnitt 3.1.34 beschriebene Simulationswerkzeug verwendet. Durch das Ergebnis dieser Analyse kann der Lösungsraum x formuliert werden. Aus der Abfrage der gewünschten Vorgaben des Nutzers sollen die Teilnutzen, die in der aufgezeigten Zielfunktion auftreten, bestimmt werden und selbige erzeugen. Die Kombination des Lösungsraums mit der Zielfunktion ergibt im Abschluss das sogenannte Optimierungsmodell. Dieses stellt den Gesamtnutzen dar, welcher mit Hilfe einer mathematischen Optimierung maximiert wird. Am Ausgang des Software-Tools steht ein Lösungsvektor x, der die Anzahl der Fahrzeuge pro Antriebskonfiguration beinhaltet.

Die Festlegung der Bewertungskriterien soll dabei eigenständig auf Seiten des Nutzers erfolgen und kann sich beispielsweise nach einer einzuhaltenden Car Policy richten. Das Ergebnis der Flottenoptimierung stellt die mathematische Beschreibung eines virtuellen Fuhrparks dar. In dieser wird die exakte Auflistung und Anzahl an Fahrzeugen unterschiedlicher Antriebsvarianten ausgedrückt.

3.1.38 AP 8200 Entwicklung eines Werkzeugs zur Bestimmung der optimalen Zusammensetzung von Fahrzeugflotten hinsichtlich der Antriebskonzepte unter Berücksichtigung unternehmensspezifischer und umweltrelevanter Randbedingungen

Die in Abschnitt 3.1.37 aufgezeigte Lösungsmethode zur Bestimmung der optimalen Zusammensetzung von Fahrzeugflotten stützt sich in erster Linie auf die mathematische Optimierung einer Zielfunktion. Diese besitzt Abhängigkeiten zu Nutzervorgaben sowie einem Lösungsraum, der eine mögliche Fuhrparkzusammensetzung repräsentiert. Durch Bestimmung des globalen Maximums der Zielfunktion, die den Gesamtnutzen entspricht, kann eine Fahrzeugkonfiguration ermittelt werden, die die getroffenen Anforderungen durch den Nutzer bestmöglich befriedigt.

Im Zuge dieses Arbeitspaketes wurde das entwickelte Lösungskonzept in Form eines Software-Tools in MATLAB umgesetzt. Dazu wurde der schematische Ablauf des Tools, der in Abbildung 183 präsentiert wurde, implementiert und eine benutzerfreundliche grafische Oberfläche zur Interaktion mit dem Nutzer generiert. Über diese Schnittstelle sollte es dem Nutzer möglich sein, ohne Kenntnis des dahinterliegenden Software-Konstrukts, auf Basis seiner Eingangsdaten eine passende Fuhrparkkonfiguration als Ausgang zu erhalten. Die Oberfläche der grafischen Benutzeroberfläche ist in Abbildung 184 abgebildet.

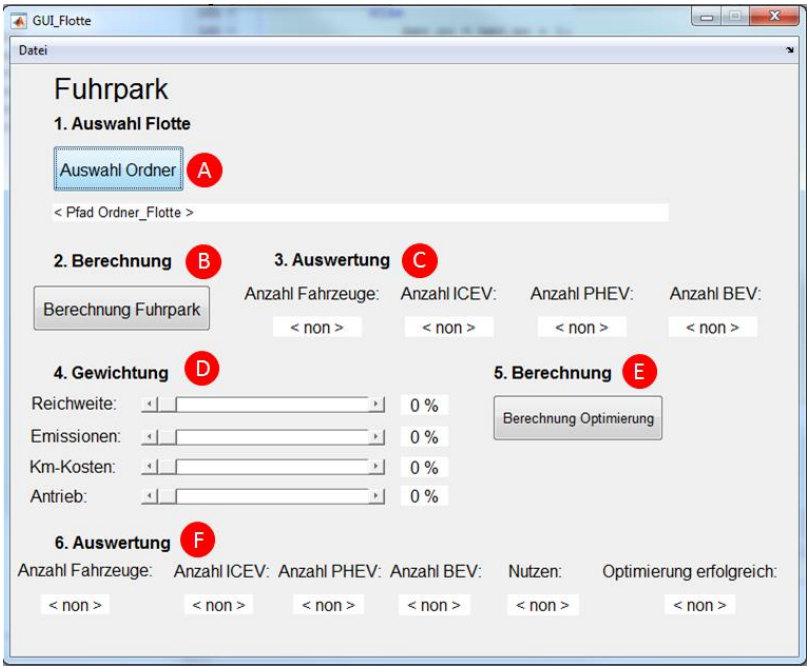


Abbildung 184: Grafische Benutzeroberfläche des Tools zur Flottenoptimierung

Die Bedienoberfläche lässt sich in sechs Bereiche unterteilen. Im Bereich A besitzt der Benutzer die Möglichkeit einen Ordner mit den hinterlegten Fahrprofilen seiner Flottenfahrzeuge auszuwählen. Dabei befinden sich die Fahrdaten jedes Fahrzeugs wiederum in einem eigenen Unterordner. Nach erfolgreicher

Auswahl der Fahrprofile erfolgt im Unterpunkt B der GUI die simulationsgestützte Berechnung der Fahrdaten. Dabei wird, wie in Abschnitt 3.1.37 erwähnt, geprüft, wie viele Fahrzeuge potentiell bei Beibehaltung des Nutzungsverhaltens durch rein batterieelektrische bzw. hybride Fahrzeugtypen ersetzt werden könnten. Anhand dieser Berechnung können Nebenbedingungen in Form von Obergrenzen der jeweiligen Fahrzeugtypen für die spätere Fuhrparkoptimierung aufgestellt werden. Das Ergebnis der Simulation wird im Bereich C angezeigt und ist in Abbildung 185 beispielhaft für eine Flotte von 11 Fahrzeugen dargeboten.

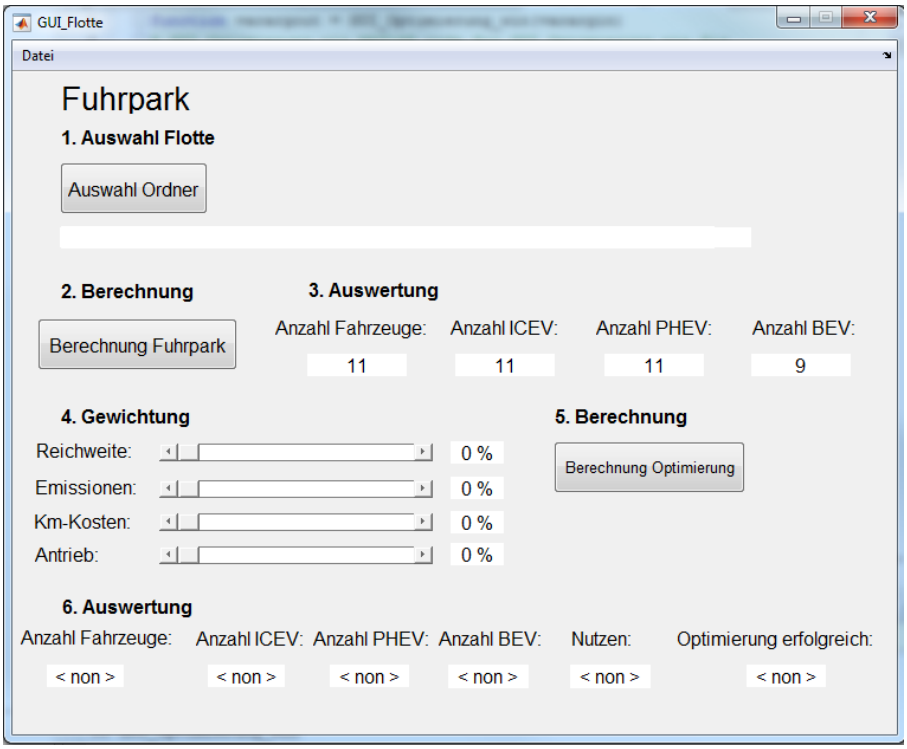


Abbildung 185: Ermittelte Nebenbedingungen bei der Fuhrparksoptimierung

Aus der simulationsgestützten Machbarkeitsanalyse folgt, dass 9 von 11 Fahrzeugen potentiell mit einem rein batterieelektrischen Fahrzeug ausgetauscht werden könnten. Alle Fahrprofile können dagegen mit einem hybriden Fahrzeugtypen absolviert werden. Da die Anzahlen aller Fahrzeugkonfigurationen größer als null sind, folgt, dass die Fuhrparkoptimierung im Lösungsraum x zwischen batterieelektrischen, hybriden und konventionellen Fahrzeugen unterscheidet. Dabei kann der Lösungsvektor bis zu neun BEV, 11 PHEV sowie 11 ICEV aufweisen, wobei die Gesamtsumme des Lösungsraums die Anzahl von elf Fahrzeugen nicht überschreiten darf. Demzufolge können für die Optimierung bereits folgende Nebenbedingungen formuliert werden:

$$
\begin{aligned}
n_B \geq x_B \geq 0 \\
n_H \geq x_H \geq 0 \\
n_I \geq x_I \geq 0 \\
x_B + x_H + x_I = n_{FP,ges}
\end{aligned}
\tag{3-41}
$$

Auf Grundlage dieser ermittelten Nebenbedingungen erfolgt die eigentliche Optimierung der Fuhrparkkonfiguration hinsichtlich gewünschter Nutzervorgaben. Zur Formulierung des mathematischen Optimierungsproblems in (3-39) im vorherigen Arbeitspaket bedarf es der Quantifizierung konkreter Teilnutzen für unterschiedliche Randbedingungen. Diese Randbedingungen werden mit gezielten Nutzervorgaben, die im Bereich D durch Schieberegler vorgenommen werden können, prozentual gewichtet. Wie aus der Abbildung der grafischen Nutzeroberfläche zu sehen ist, wurde die Optimierung im Wesentlichen auf die Kriterien der Reichweite, der Emissionen, der Kilometer-Kosten sowie des favorisierten Antriebs beschränkt. Im Anbetracht der im Abschnitt 3.1.37 festgelegten Kriterien entsprechen somit die Reichweite und der Antrieb der Kombination aus Nutzungsdauer und Flexibilität. Das Kriterium „Prestige“ wird gezielt außer Acht gelassen, da sich dieses subjektive Empfinden häufig eher auf eine spezielle Marke als auf eine Antriebsstrangvariation bezieht.

Auf Grundlage einer Conjoint-Analyse, die durch den Lehrstuhl für Allgemeine BWL und Automobilwirtschaft der Universität Duisburg-Essen durchgeführt worden ist, konnten Teilnutzenwerte für diese Kriterien aus Nutzerumfragen abgeleitet werden. Daraus ergaben sich die im Folgenden in Rot dargestellten Zusammenhänge für die aufgeführten Kriterien (vgl. Abbildung 186, Abbildung 187, Abbildung 188). Um die Ergebnisse z.B. auf beliebige Reichweiten transformieren zu können, werden die Resultate der Conjoint-Analyse durch Polynome angenähert. Diese werden durch die blau-gestrichelte Linie repräsentiert. In Abbildung 186 ist zunächst der bestimmte Teilnutzen aus der Reichweite der Fahrzeuge aufgezeigt.

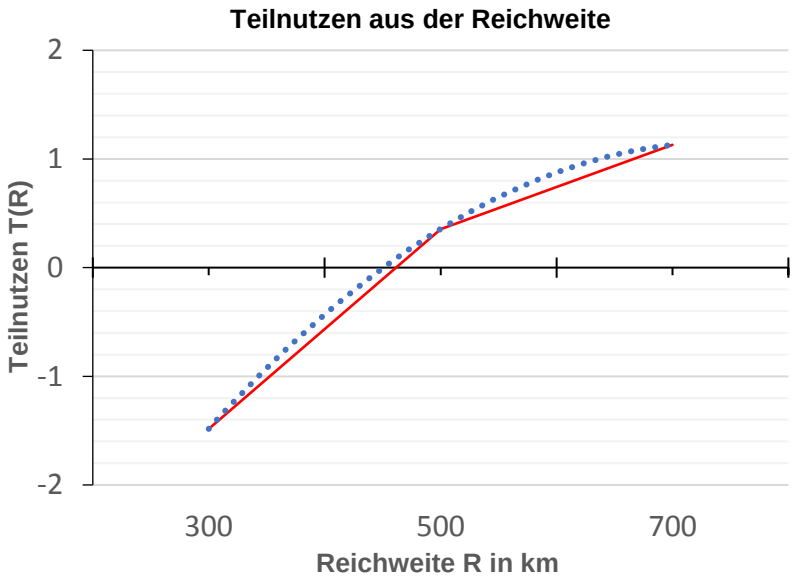


Abbildung 186: Ermittelter Teilnutzen aus der Reichweite der Fahrzeuge

Die ermittelte Regressionsfunktion für den ermittelten Teilnutzen der Reichweite der Fahrzeuge lautet:

$$T(R) = -0{,}0000133\ R^2 + 0{,}019817\ R - 6{,}233837 \qquad (3\text{-}42)$$

wobei R die Reichweite in Kilometern beschreibt. Aus der Conjoint-Analyse der Teilnutzen aus den ausgestoßenen CO_2-Emissionen ließ sich der in Abbildung 187 dargestellte Zusammenhang ableiten:

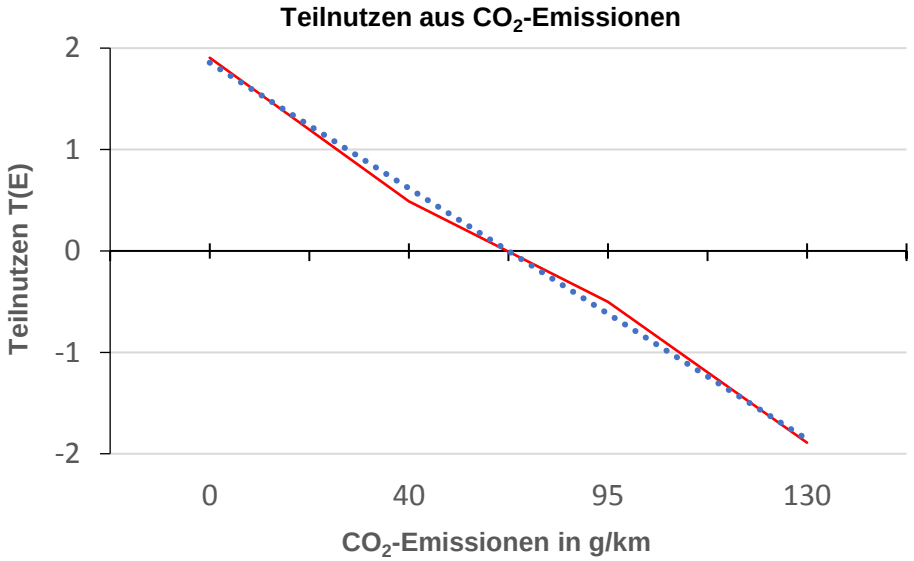


Abbildung 187: Ermittelter Teilnutzen aus den CO_2-Emissionen

Dabei ließ sich folgende Regressionsfunktion zur Beschreibung des emissionsabhängigen Teilnutzen $T(E)$ ermitteln:

$$T(E) = -0{,}027482E + 1{,}820652 \quad (3\text{-}43)$$

Neben den zuvor aufgezeigten Kriterien der Reichweite und ausgestoßenen CO_2-Emissionen wurde weiterhin folgender Teilnutzen aus den Kilometerkosten in Cent pro Kilometer festgemacht (vgl. Abbildung 188):

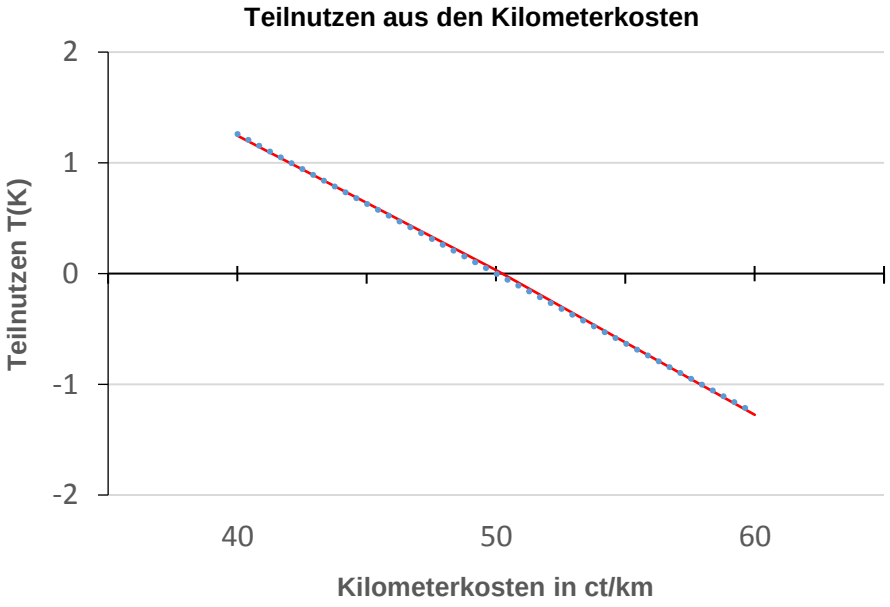


Abbildung 188: Ermittelter Teilnutzen aus den Kilometerkosten

Die Regressionsgerade, mit der der Zusammenhang zwischen dem Teilnutzen und den Kilometerkosten in Cent pro Kilometer beschrieben werden kann, ist in nachfolgend aufgetragen.

$$T(K) = -0{,}126033K + 6{,}301653 \quad (3\text{-}44)$$

Die bisher aufgezeigten Teilnutzen zeigen, dass die Umfrageteilnehmer besonders viel Wert auf eine hohe Reichweite sowie geringe CO_2-Emissionen und Kilometer-Kosten legen. Kleine Reichweiten sowie hohe Emissionen und Kosten pro Kilometer werden dagegen durch einen negativen Nutzen abgestraft. Aus der Kombination dieser Teilnutzen folgt, dass keine bestehende Antriebskonfiguration die ausgedrückten Forderungen vollends befriedigen kann. Dementsprechend kann ausschließlich ein Optimum gefunden werden, das die Ansprüche bestmöglich erfüllt.

Neben der Quantifizierung der Nutzenwerte für Reichweite, Emissionen und Kilometerkosten wurde der in Tabelle 88 aufgeführte Teilnutzenwert für den Typ der Flottenfahrzeuge erhoben.

Tabelle 88: Ermittelter Teilnutzen aus der Antriebsvariante

Antriebsvariante	Teilnutzen
ICEV	-0,960
PHEV	0,363
BEV	0,597

Aus diesem geht hervor, dass die Umfrageteilnehmer die rein batterieelektrischen Fahrzeuge sehr positiv bewerten und die konventionellen Verbrenner abstrafen. Die hybriden Fahrzeugkonfigurationen weisen aufgrund ihres anteiligen elektrifizierten Antriebsstrangs ebenfalls einen positiven Nutzen auf.

Auf Basis der erhobenen Daten können für Annahmen von Reichweite, Emissionsausstoß und Kilometerkosten von batterieelektrischen, hybriden und konventionellen Fahrzeugen vereinfacht Teilnutzenwerte bestimmt werden. Dazu wurden die in Tabelle 89 aufgezeigten Annahmen verwendet. [97] [98]

Tabelle 89: Annahmen zur Berechnung statischer Teilnutzen

Ausprägung	ICEV	PHEV[99]	BEV
Reichweite in km	700	300	190
CO_2 -Emissionen in g/km	128,8	13	0
Km-Kosten in ct/km	32,5	35	35
Antrieb	1	1	1

Alle Kilometerkosten entstammen einer Total Cost of Ownership-Betrachtung bei einer angenommenen Fahrleistung von 15.000 km/Jahr. Diese Jahresfahrleistung entspricht in etwa der durchschnittlichen Fahrleistung von 14.015 Kilometern pro Jahr, die das Kraftfahrt-Bundesamt für PKW im Jahr 2016 berechnet hat. [100]

Zu den getroffenen Annahmen kann mit Hilfe der aufgezeigten Polynome der jeweilige Teilnutzen für jede Fahrzeugkonfiguration bestimmt werden (vgl. Tabelle 90).

[97] Vgl. BMW Group (2016), S. 51

[98] Vgl.Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. (2013), S.28. Annahme eines Verbrauchs von 5,6 l / 100 km

[99] Als PHEV wird im Zuge der dargestellten Flottenoptimierung zu Darstellungszwecken der BMW i3 mit Range Extender betrachtet, obwohl dieser im eigentlichen Sinne nicht der Gruppe PHEV zugeordnet werden kann.

[100] Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2017), S. 1

Tabelle 90: Teilnutzen der Kriterien für alle Fahrzeugkonfigurationen

Teilnutzen	ICEV	PHEV	BEV
Reichweite in km	1,12	-1,49	-2,95
CO_2-Emissionen in g/km	-1,72	1,46	1,82
Km-Kosten in ct/km	2,21	1,89	1,89
Antrieb	-0,96	0,36	0,60

Diese statischen Teilnutzen werden innerhalb der im Bereich E angestoßenen Fuhrparkoptimierung durch nutzerspezifische Gewichtung zusätzlich skaliert. Dabei kann der Nutzer insgesamt 100% Gewichtung auf die vier aufgezeigten Kriterien verteilen. Das Ergebnis der Optimierungsberechnung stellt die Konstellation eines Fuhrparks dar, der unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen, die gewichteten Nutzervorgaben bestmöglich erfüllt. Die genaue Verteilung auf die jeweilige Fahrzeugkonfiguration wird im Bereich F dargeboten. So ergeben sich für den als Beispiel herangezogenen Fuhrpark, der aus elf Fahrzeugen besteht, bei unterschiedlichen Gewichtungen die nachfolgenden Resultate (vgl. Abbildung 189, Abbildung 190, Abbildung 191).

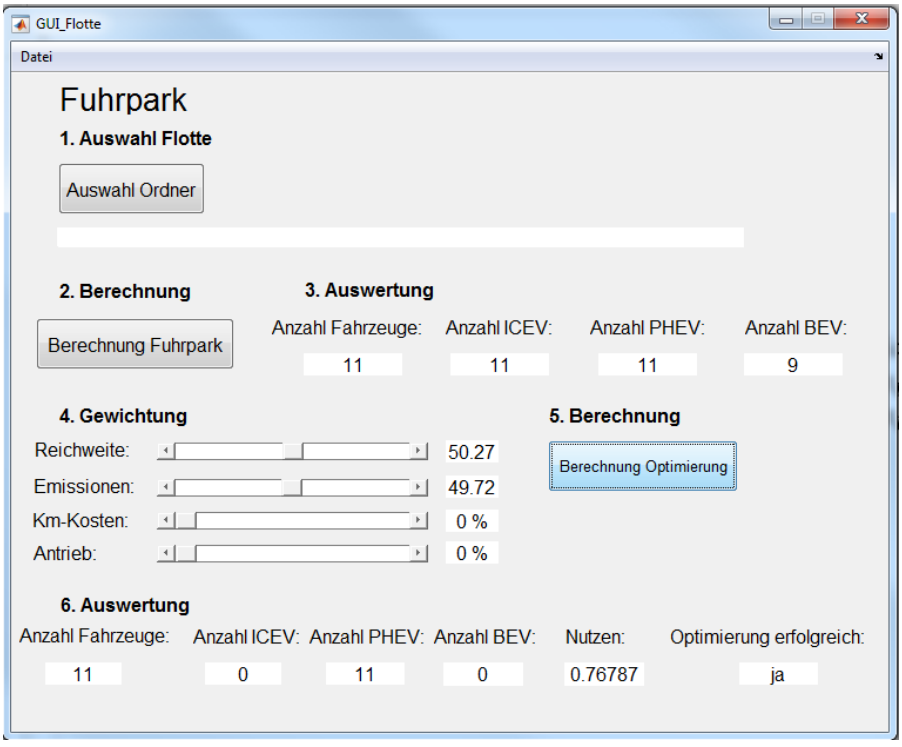


Abbildung 189: Resultat der Fuhrparkoptimierung

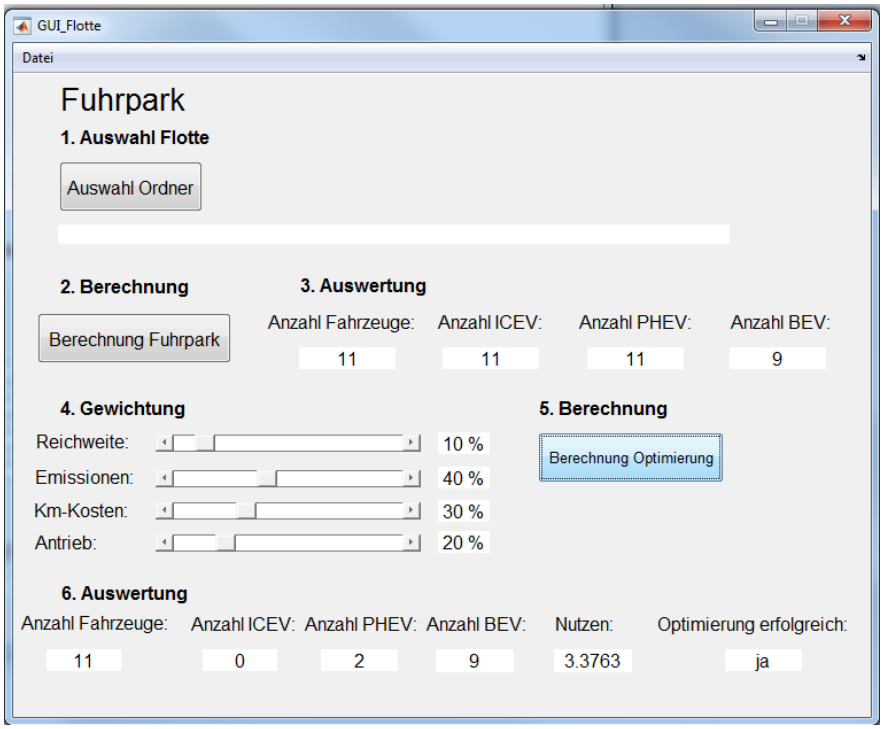


Abbildung 190: Resultat der Fuhrparkoptimierung

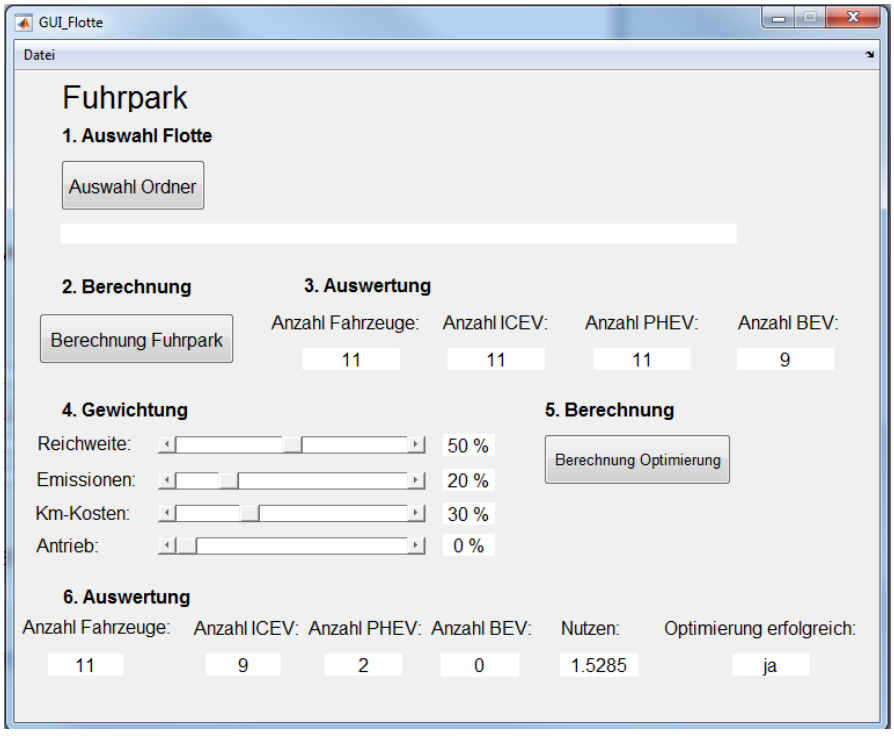


Abbildung 191: Resultat der Fuhrparkoptimierung

Anhand dieser Ergebnisse wird bereits das Potenzial einer Fuhrparkoptimierung zur Bestimmung der bestmöglichen nutzerspezifischen Flottenverteilung deutlich. Ausgehend von unterschiedlichen Gewichtungen ergeben sich völlig verschiedene Kombinationen der Antriebstopologien, wobei durch die Angabe des Nutzens aufgezeigt wird, wie eindeutig das Ergebnis ausgefallen ist.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Zuge dieses Arbeitspaketes ein Software-Tool entwickelt worden ist, welches in der Lage ist, dem Nutzer bzw. Fuhrparkleiter eine Einschätzung darüber zu geben, welche Fuhrparkkonstellation zu welchen Vor- bzw. Nachteilen führt. Die Optimierung fand dabei anhand einer mathematischen Zielfunktion statt, wobei das globale Maximum dieser Zielfunktion die bestmögliche Fuhrparkkonstellation für eine nutzerspezifische Gewichtung von Kriterien darstellt. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die derzeitige Berechnung auf Grundlage der aufgezeigten Annahmen fungiert. Diese umfassen Richtwerte für die Reichweite, den CO_2-Ausstoß sowie die Kilometer-Kosten der batterieelektrischen, hybriden und konventionellen Fahrzeuge. Demzufolge basiert das Berechnungsmodell auf statischen Kennwerten. Um dem schnellen Entwicklungszyklus der alternativen Antriebstopologien und weiteren äußeren Einflüssen Rechnung zu tragen, müsste dieses Software-Tool in weiteren Arbeiten an eine dynamische Parametrisierung angepasst werden. Dazu müssten z.B. Berechnungen aus einem dynamischen TCO-Tool miteinfließen. Nichtsdestotrotz schafft das umgesetzte Software-Tool für den Nutzer die Möglichkeit, Erfahrungen und Zusammenhänge in Bezug auf die Potentiale von alternativen Antriebskonzepten im Kontext eines Fuhrparks zu sammeln.

3.1.39 AP 8300 Ableitung praxisgerechter Fahrzyklen für BEV und PHEV aus den Flottenergebnissen

Für die Analysen außerhalb der im Projekt vermessenen Fahrzeugbewegungen sind realistische und zugleich typische Fahrzyklen unabdingbar. Viele Angaben eines Fahrzeugs, die auf der Basis synthetischer Zyklen an einem Prüfstand ermittelt werden, können im realen Einsatz nicht standhalten. Die im Projekt festgestellten Fahrzeugbewegungen wurden daher eingehend analysiert, so dass aussagekräftige Fahrzyklen extrahiert werden konnten. Diese sollen das Flottenverhalten hinreichend genau beschreiben und nachweisbare Rückschlüsse auf das reale Verbrauchs- und Emissionsverhalten von elektrifizierten Fahrzeugen im Flottenkontext zulassen.

Um ausgehend von einer Datenbasis einen repräsentativen Fahrzyklus zu generieren, existieren unterschiedliche Herangehensweisen, wie z.B. die Fahrtsequenz-Methode oder ein stochastischer Ansatz mittels Markov-Ketten. Im Zuge dieses Arbeitspaketes wurde die erstgenannte Methodik angewendet, da sie eine begrenzte Komplexität aufweist, direkt mit den aufgezeichneten Fahrdaten kompatibel ist und bereits

in anderen Anwendungen erfolgreich verwendet wurde.[101] [102] Das Ziel dieser Methode besteht darin, aus der Kombination von sogenannten Fahrtsequenzen ein aufgezeichnetes Fahrverhalten bestmöglich abzubilden. Der Begriff Fahrtsequenz steht dabei für einen Fahrtabschnitt zwischen zwei Zeitpunkten, an denen die Geschwindigkeit null beträgt. In Abbildung 192 werden schematisch die Anteile von Fahrtsequenzen während einer aufgenommenen Fahrt aufgetragen.

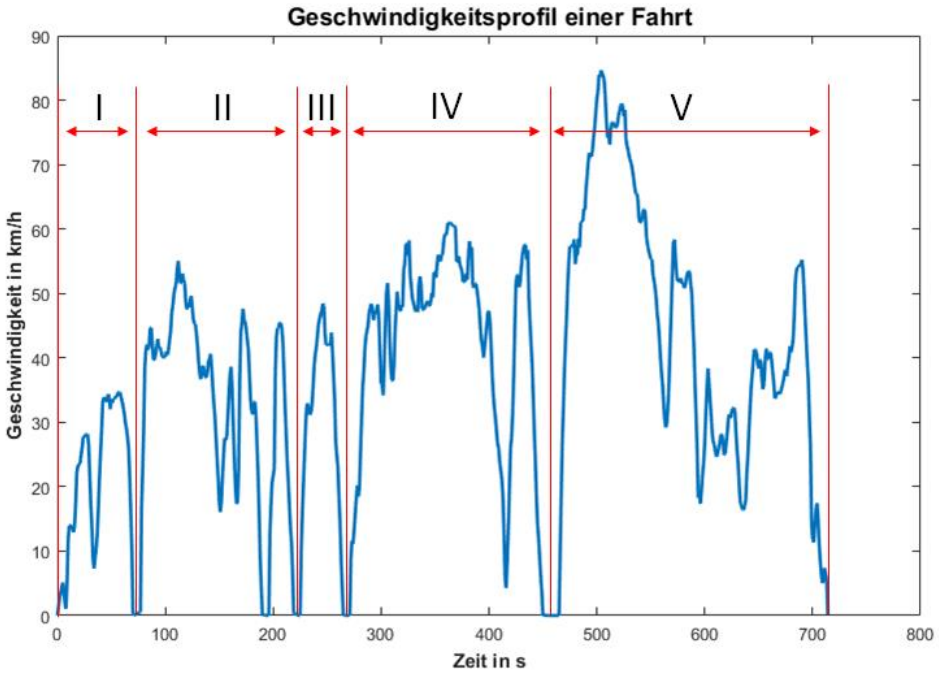


Abbildung 192: Geschwindigkeitsprofil unterteilt in Fahrtsequenzen

Diese Fahrtstreckenanteile können hinsichtlich festgelegter Kennwerte klassifiziert werden. Ebenso lässt sich das gesamte Fahrverhalten eines Nutzers durch Bestimmung dieser Kennwerte für ein gesamtheitliches Fahrprofil bestimmen. Zur Beschreibung des Fahrverhaltens wurden die in Tabelle 91 aufgeführten Bewertungsparameter ausgewählt.[102] [103] [104]

[101] Vgl. Tong et al. (1999)

[102] Vgl. Pfriem (2016)

[103] Vgl. Hung et al. (2007)

[104] Vgl. Galgamuwa et al. (2015)

Tabelle 91: Parameter zur Bewertung eines Fahrverhaltens

Kategorie	Parameter	Einheit
Durchschnitt	Geschwindigkeit	m/s
	Geschwindigkeit > 0	m/s
	Beschleunigung	m/s²
	Verzögerung	m/s²
	Fahrtsequenzlänge	s
Relativer Zeitanteil Betriebsart	Schleichen	%
	Konstantfahrt	%
	Beschleunigung	%
	Verzögerung	%
Anzahl	Beschleunigungs-Verzögerungs-Wechsel	

Dabei wird der Zustand „Schleichen“ durch Geschwindigkeiten kleiner bzw. gleich 5 km/h definiert. Eine Konstantfahrt entspricht Fahranteilen, in denen die Geschwindigkeit größer als 5 km/h ist sowie weder beschleunigt noch abgebremst wird und die auftretende Beschleunigung folglich null ist. [105]

Die Gesamtheit der aufgetragenen Bewertungsparameter repräsentiert das betrachtete Fahrprofil, wobei die gesamte Datengrundlage analysiert wird. In einem anschließenden Schritt werden durch stochastische Kombination der ermittelten Fahrtsequenzen eine Reihe möglicher Fahrzyklen gebildet. Diese zufällig zusammengesetzten Fahrzyklen werden ebenfalls anhand der festgelegten Kriterien dahingehend untersucht, ob sie das abzubildende Fahrprofil ausreichend genau repräsentieren. Um einen vergleichbaren Wert zu erhalten, wird ein sogenannter Performance Value, kurz PV, eingeführt, der sich aus der

[105] Weitere Information sind Pfriem (2016) zu entnehmen.

Summe der relativen Abweichung der Bewertungsparameter aus dem generierten Fahrzyklus zu den Zielparametern der gesamten Datengrundlage berechnet. Der erzeugte Fahrzyklus, der den geringsten Performance Value aufweist, bildet das aufgenommene Fahrprofil bestmöglich in Form eines Geschwindigkeitsprofils ab und wird als Resultat als repräsentativer Fahrzyklus für eben dieses Fahrprofil angenommen.

Nachfolgend werden drei Fahrzyklen für die rein batterieelektrischen Fahrzeuge mit und ohne Range Extender sowie Plug-In-Hybride aufgeführt. Da, wie aus Abschnitt 3.1.23 hervorgeht, lediglich ein Plug-In-Hybrid vermessen wurde, kann der ermittelte Fahrzyklus nicht als repräsentativ für alle Plug-In-Hybride angesehen werden. In Abbildung 193wird zunächst das Ergebnis des PHEV gezeigt, wobei die Datengrundlage 511 Fahrten des Plug-In-Hybrids umfasst.

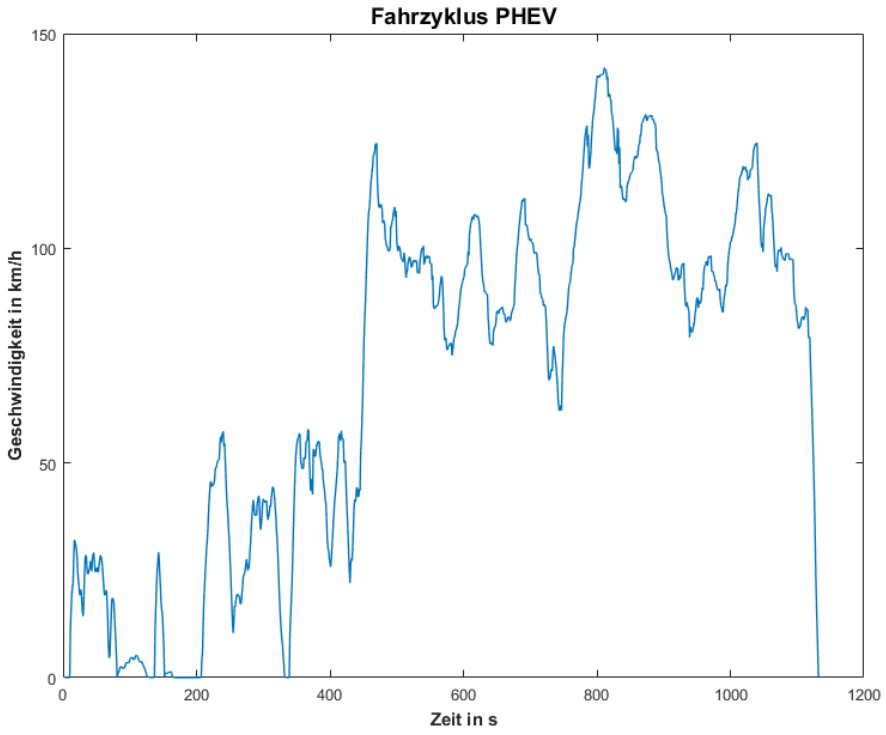


Abbildung 193: Generierter Fahrzyklus des PHEV

Die Durchschnittsgeschwindigkeit des Fahrzyklus beträgt 69,9 Kilometer pro Stunde und er besitzt eine Länge von 1132 Sekunden. Zu Beginn des Fahrzyklus findet eine ca. 400 Sekunden andauernde Stadtfahrt statt. Im Anschluss erfolgt ein Wechsel auf eine Autobahn, wobei eine Höchstgeschwindigkeit von 142 km/h erreicht wird. Die ermittelten Bewertungsparameter für den Fahrzyklus des PHEV-Fahrers sind in Tabelle 92 aufgetragen.

Tabelle 92: Bewertungsparameter des Fahrzyklus des PHEV

Kategorie	Parameter	Wertigkeit
Durchschnitt	Geschwindigkeit	19,42 m/s
	Geschwindigkeit > 0	20,43 m/s
	Beschleunigung	0,4 m/s²
	Verzögerung	-0,45 m/s²
	Fahrtsequenzlänge	1132 s
Relativer Zeitanteil Betriebsart	Schleichen	9,63 %
	Konstantfahrt	19,35 %
	Beschleunigung	38,51 %
	Verzögerung	32,51 %
Anzahl	Beschleunigungs-Verzögerungs-Wechsel	165

Neben dem generierten Fahrzyklus eines PHEV kann auch ein repräsentativer Fahrzyklus für batterieelektrische Fahrzeuge erzeugt werden. Das Ergebnis der Analyse der Fahrprofile der batterieelektrischen Fahrzeuge nach Fahrtsequenzen ist nachfolgend aufgetragen. Dabei wird zunächst ein Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge ohne Reichweitenverlängerer präsentiert und diskutiert (vgl. Abbildung 194). Die Datengrundlage für die Ableitung des repräsentativen Geschwindigkeitsprofils der BEV stellen 33.142 Fahrten von 71 rein batterieelektrischen Fahrzeugen ohne REX dar.

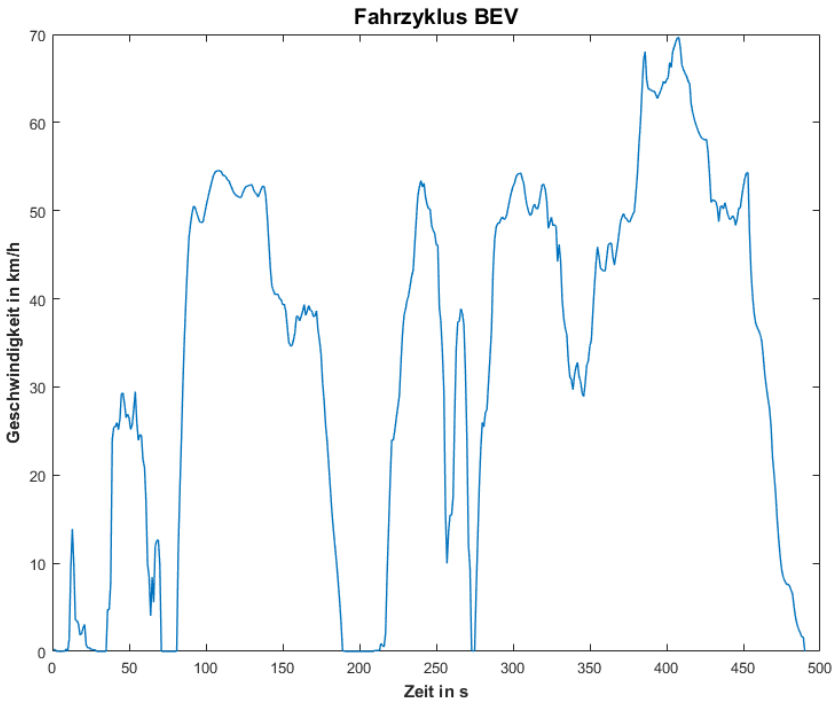


Abbildung 194: Generierter Fahrzyklus der BEV

Im Gegensatz zu dem generierten Fahrzyklus für PHEV aus Abbildung 193 beträgt die Länge des repräsentativen Geschwindigkeitsprofils der BEVs lediglich 490 Sekunden. Dies unterstreicht den Sachverhalt, dass die batterieelektrischen Fahrzeuge, wie auch Abbildung 146 zu entnehmen ist, im Gegensatz zu dem vermessenen Plug-In-Hybrid vermehrt kurze Strecken zurückgelegt haben. Der Großteil des Fahrzyklus stellt eine Stadtfahrt mit Geschwindigkeiten von etwa 50 km/h dar, welche vom Beginn des Zyklus bis zu einem Zeitpunkt von etwa 370 Sekunden anhält. Im Anschluss an diese Stadtfahrt erfolgt eine kurzweilige Landfahrt von maximal 60 Sekunden bei einer Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h. Auffällig ist, dass die durchschnittliche Geschwindigkeit bedingt durch den vermehrten Einsatz im Stadtverkehr zwar unterhalb derer des PHEV liegt, aber die positive Beschleunigung höher ausfällt. Dies kann mit dem höheren Anlaufmoment der elektrischen Maschinen erklärt werden. Die durchschnittliche Verzögerungsbeschleunigung des BEV unterliegt derer des PHEV um 0,06 m/s². Dieser Sachverhalt kann dadurch begründet werden, dass die Fahrzeuge vermehrt die Rekuperation der Fahrzeuge anstelle der mechanischen Bremse zur Reduzierung der Fahrzeuggeschwindigkeit verwenden. Der gesamte Satz an Bewertungsparametern für den Fahrzyklus der BEV ist in Tabelle 93 aufgetragen.

Tabelle 93: Bewertungsparameter des Fahrzyklus der BEV

Kategorie	Parameter	Wertigkeit
Durchschnitt	Geschwindigkeit	9,44 m/s
	Geschwindigkeit > 0	10,25 m/s
	Beschleunigung	0,45 m/s²
	Verzögerung	-0,39 m/s²
	Fahrtsequenzlänge	490 s
Relativer Zeitanteil Betriebsart	Schleichen	14,20 %
	Konstantfahrt	17,50 %
	Beschleunigung	32,89 %
	Verzögerung	35,41 %
Anzahl	Beschleunigungs-Verzöge-rungs-Wechsel	59

Ähnlich des zuvor präsentierten Fahrzyklus der rein batterieelektrischen Fahrzeuge ohne Range Extender gestaltet sich auch der repräsentative Zyklus der Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerer. Das Ergebnis der Zyklusgenerierung für die REX ist in Abbildung 195 aufzufinden. Zur Generierung des Zyklus dient eine Datengrundlage aus 27.572 Fahrten von 124 Elektrofahrzeugen mit Range-Extender.

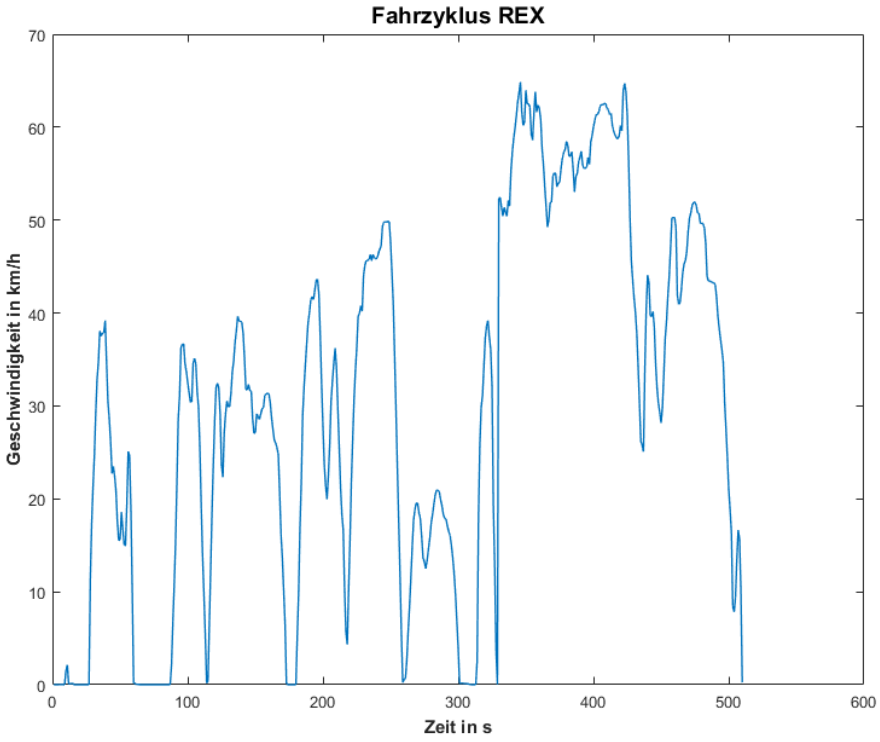


Abbildung 195: Generierter Fahrzyklus der REX

Zu Beginn tritt eine Stadtfahrt von etwa 300 Sekunden auf. In dieser werden Geschwindigkeiten von bis zu 50 km/h erreicht. Anschließend folgt ein etwa 100-sekündiger Anteil einer Fahrt auf einer Landstraße, welcher bei ungefähr 420 Sekunden erneut in eine Stadtfahrt mündet. Wie der Fahrzyklus der BEV zuvor unterschreitet die Länge des repräsentativen Geschwindigkeitsprofils der Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerer derer des Zyklus des Plug-In-Hybrids. Dabei unterscheiden sich die Fahrtsequenzlängen der BEV und REX ausschließlich um 20 Sekunden. Die Höchstgeschwindigkeit des Zyklus beträgt ca. 65 km/h, wobei deutlich höhere Antriebs- und Bremsbeschleunigungen als beim BEV auftreten. Dementsprechend weist das Geschwindigkeitsprofil des REX eine höhere Dynamik auf, obwohl die durchschnittliche Geschwindigkeit unterhalb derer des BEV aufzufinden ist. Da der Energiebedarf nicht unwesentlich von den auftretenden Beschleunigungen abhängt, kann hier der Einfluss des vorhandenen Range-Extender erkannt werden. Dieser gibt dem Fahrer zusätzliche Sicherheit und mildert die Auswirkungen von z.B. auftretender Reichweitenangst. Die genauen Bewertungsparameter des Fahrzyklus der Elektrofahrzeuge mit Range-Extender sind in Tabelle 94 aufgetragen.

Tabelle 94: Bewertungsparameter des Fahrzyklus der REX

Kategorie	Parameter	Wertigkeit
Durchschnitt	Geschwindigkeit	8.41 m/s
	Geschwindigkeit > 0	9,36 m/s
	Beschleunigung	0,63 m/s²
	Verzögerung	-0,59 m/s²
	Fahrtsequenzlänge	510 s
Relativer Zeitanteil Betriebsart	Schleichen	14,90 %
	Konstantfahrt	13,92 %
	Beschleunigung	33,53 %
	Verzögerung	37,65 %
Anzahl	Beschleunigungs-Verzögerungs-Wechsel	61

Aus dem Vergleich der drei präsentierten Fahrzyklen geht hervor, dass sich besonders Unterschiede hinsichtlich der Fahrtsequenzlänge sowie der Fahrtumgebung aufzeigen. Wie zuvor erwähnt, gilt es dabei zu berücksichtigen, dass der generierte Zyklus des PHEV bedingt durch die Datengrundlage eines Fahrzeugs nicht als repräsentativ für alle Fahrzeuge dieses Typs angesehen werden kann. Während der Zyklus des Plug-In-Hybrids anteilig eine Autobahnfahrt enthält, weisen die Geschwindigkeitsprofile der BEV bzw. REX keine Anteile auf diesem Straßentyp auf. Dementsprechend unterschreiten die durchschnittlichen Geschwindigkeiten, die in den Zyklen der BEV und REX auftreten, die des PHEV. Da die Ergebnisse des BEV bzw. REX vorrangig aus Stadtfahrten bestehen, beinhalten sie deutlich höhere Standzeiten als der PHEV. Dieser Fakt wird auch durch die erhöhten relativen Zeitanteile des Schleichens deutlich. Ein Vergleich der Zyklen der BEV und REX ergibt, dass beide ähnliche charakteristische Bewegungsmuster besitzen. Dabei ist festzuhalten, dass die REX bedingt durch die Sicherheit eines Range-Extenders deutlich dynamischer bewegt werden.

3.1.40 AP 8400 Definition und Analyse von Zukunftsszenarien und Bewertung hinsichtlich Umwelt, Ökonomie und Technik

Das vorgegebene Ziel des Arbeitspaketes 8400 stellte die Definition und Analyse verschiedener umweltrelevanter, ökonomischer und technisch bedingter Zukunftsszenarien dar. Dabei sollte gesondert der Einfluss auf eine zielgenaue Fahrzeugauswahl bewertet werden. Da bereits in den Abschnitten 3.1.19 bis 3.1.21 Prognosen hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung von Einflussgrößen wie dem Kraftstoffpreis, der Kosten der Traktionsbatterie sowie der Energiekosten aufgeführt werden, wird an dieser Stelle ausschließlich auf deren mögliche Konsequenzen eingegangen.

Die Konstellation der flächendeckenden Fahrzeugverteilung in Deutschland bzw. weltweit wirkt sich nachhaltig auf die Veränderung des Gesamtverkehrs aus. Derzeit beträgt der Anteil an Fahrzeugen mit (teil-) elektrifizierten Antrieben am gesamten PKW-Bestand in Deutschland weniger als ein Prozent.[106] Bedingt durch Überschreitungen von Schadstoffbegrenzungen besteht die Möglichkeit, dass zukünftig besonders im urbanen Raum bzw. in Metropolregionen Fahrverbote für konventionelle Verbrennerfahrzeuge eingeführt werden. Diese Mobilitätseinschränkungen weisen vor allem Konsequenzen für den Nutz- und Individualverkehr auf. Eine Folge stellt die Veränderung der bestehenden Mobilität im urbanen Raum dar. Dabei sind verschiedene Szenarien und folglich auch unterschiedliche Konstellationen für den zukünftigen Gesamtverkehr denkbar. Bestehende Analysen kommen zu dem Schluss, dass im Wesentlichen die Fragestellung nach den kommenden Potentialen der Elektromobilität mögliche Szenarien und folglich auch deren Konsequenzen bestimmen.[107] Daraus ableitend lassen sich zwei Zukunftsszenarien für die Elektromobilität für das Jahr 2030 definieren:

1) Die Elektromobilität etabliert sich im Individualverkehr der Zukunft – Konventionelle Verbrenner und Plug-In-Hybride stellen eine Minderheit dar.

2) Die Elektromobilität setzt sich nur eingeschränkt im Individualverkehr durch – Der Gesamtverkehr besteht mehrheitlich aus Plug-In-Hybriden und einem geringen Anteil von konventionellen Verbrennern

Bei Eintreten des ersten Szenarios ist davon auszugehen, dass die Mehrheit des zukünftigen Individualverkehrs rein elektrisch vollzogen wird. Dafür sprechen die Prognosen hinsichtlich sinkender Kosten der Li-Ion-Batterien (s. Abbildung 97) sowie steigender Preise für konventionelle Treibstoffe (vgl. Tabelle 31).

[106] Vgl. Statista GmbH (2017)

[107] Vgl. Fraunhofer IAO (2012)

Weiterhin beinhaltet die Historie der Energiekosten, die in Abbildung 101 aufgezeigt werden, deutlich geringere Preisanstiege als die der konventionellen Kraftstoffe, so dass zukünftig bis in das Jahr 2030 von einer stabilen Entwicklung mit geringfügig steigenden Preisen ausgegangen werden kann.[108] Aus ökonomischer Sicht kann dieses Szenario nur eintreten, wenn der Individualverkehr der Elektromobilität weiterhin an Attraktivität gewinnt, so dass weiterer enormer Aufwand durch die OEMs betrieben wird, um die bestehenden Technologien zu verbessern. Dazu können unter anderem die Standardisierung von Komponenten wie der Traktionsbatterie oder die Anpassung bestehender Elektrofahrzeuge an übergreifende Nutzungsverhalten zählen. Auf Grundlage der Auswertung der objektiven und subjektiven Datengrundlage (s. Abbildung 37 und Abbildung 147) können z.B. für den gegenwärtigen Zustand Vorgaben für einheitliche Tagesreichweiten von etwa 200 km bis zu maximal 300 km formuliert werden. Ebenfalls ist eine weitere staatliche Subventionierung der alternativen Antriebskonzepte notwendig (vgl. Abbildung 109).

Mit einem wachsenden Anteil an rein elektrifizierten Verkehrsteilnehmern steigt auch der Bedarf nach einer ausreichend erschlossenen dezentralen Ladeinfrastruktur sowie intelligenten Vernetzungsstrukturen. Ebenso stellt eine dezentrale leistungsfähige Ladeinfrastruktur eine Grundvoraussetzung für eine im Individualverkehr etablierte Elektromobilität dar. Dementsprechend muss von vorherigen Investments in diesem Bereich und weiterem Aufwand in Forschung und Entwicklung von alternativen Ladeszenarien ausgegangen werden. Gerade in Ballungsräumen ermöglicht eine intelligente und erschlossene Infrastruktur einerseits die Kommunikation zwischen vereinzelten Verkehrsteilnehmern und erlaubt somit beispielsweise den Austausch von verkehrsrelevanten Informationen, die die Reichweite und Effizienz des Elektrofahrzeugs nachhaltig beeinflussen (Stau, defekte Ladeinfrastruktur). Andererseits gestattet eine erschlossene digitale Infrastruktur den Nutzen eines Elektrofahrzeugs über den Mobilitätssektor hinaus als Zwischenspeicher (Smart Grid) für überschüssige Energie, welche anderweitig im Netz vernichtet werden müsste. Folglich kann diesem Szenario eine erhöhte Energieeffizienz attestiert werden. Abhängig von der Energieerzeugung lassen sich zusätzlich die Schadstoffausstöße in der Well-to-Wheel-Betrachtung der Elektrofahrzeuge reduzieren bzw. in der Emissionsbilanz vor Ort vollständig eliminieren.

Ausgehend davon, dass die formulierten Ziele des Erneuerbare-Energien-Gesetz der Bundesregierung erreicht werden, wird sich die Zusammensetzung des Energiemix grundlegend ändern. Bei Annahme einer 40-60%-igen Deckung des Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Energien, lassen sich THG-Emissionsfaktoren von etwa 150 g CO_2-Äquivalente pro kWh prognostizieren.[108] [109]

[108] Vgl. Koppers (Unveröffentlicht)

[109] Vgl. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2014), S. 7

Zusammenfassend bildet dieses Szenario die Vision einer grünen Mobilität im Gesamtverkehr ab. Die Voraussetzung dafür stellt weiterhin die zunehmende Attraktivität der Elektrofahrzeuge für den Individualverkehr dar.

Im Zuge eines kontroversen Zukunftsszenarios wird angenommen, dass sich die Elektrofahrzeuge nicht signifikant im Individualverkehr durchsetzen. Ursachen liegen in hohen Anschaffungskosten, ungenügenden Reichweiten sowie einer mangelnden Ladeinfrastruktur. Folglich setzt sich der Gesamtverkehr weitestgehend aus Hybriden und einer geringen Anzahl konventionell betriebener Fahrzeuge zusammen. Bedingt durch die Annahme, dass zukünftig Fahrverbote die Einfahrt in den urbanen Raum bzw. Metropolregionen einschränken, wird der Individualverkehr dort vorrangig durch öffentliche Verkehrsmittel bestimmt werden. Daher kann von steigenden Fahrkartenpreisen ausgegangen werden, da das Angebot die Nachfrage kaum decken wird. Außerhalb dieser Regionen findet der Verkehr mit den zuvor genannten Fahrzeugtypen statt. Obwohl die Verbrennerfahrzeuge ihren Emissionsausstoß durch eine Steigerung der Energieeffizienz und vermehrte Verwendung von Biotreibstoff bis 2020 um bis zu 30% senken können, ist eine weitere Reduzierung des Schadstoffausstoßes kostspielig und daher unwahrscheinlich.[110] Der Emissionsausstoß der Fahrer der teilelektrifizierten Hybriden hängt in erster Linie von deren Nutzungsverhalten und Fahrprofil ab (vgl. 3.1.35). Aus ökonomischer Sicht hat sich die Entwicklung und Umsetzung der Elektrofahrzeuge für die OEMs als nicht gewinnbringend erwiesen, wodurch fortwährende Weiterentwicklungen eingestellt wurden. Unternehmen und Branchen, deren Dienstleistungen eine individuelle Mobilität im urbanen Raum voraussetzen, haben eine Eigenentwicklung von elektrifizierten Nutzfahrzeugen mit notwendigen Eigenschaften angestrebt. Dementsprechend findet keine Standardisierung von Komponenten wie der Traktionsbatterie statt, so dass gleichbleibende Kosten für die Batterieentwicklung wahrscheinlich sind. Um diese Investments zu decken, steigen die Preise der Dienstleistungen wie z.B. Taxifahrten und Postzustellungen im urbanen Raum an.

Da Elektrofahrzeuge im Wesentlichen aus dienstlichem Interesse eingesetzt werden, genügt es, eine zentrale Ladeinfrastruktur beim jeweiligen Unternehmen umzusetzen. Die Investitionen in eine flächendeckende dezentrale Ladeinfrastruktur entfallen. Zusammenfassend beschreibt dieses Szenario einen Gesamtverkehr der ausschließlich im Bereich von Nutzfahrzeugen im urbanen Raum rein batterieelektrische Fahrzeuge aufweist. Bedingt durch den fortwährenden Einsatz von konventionellen Verbrennerfahrzeugen erscheint es schwierig, die angestrebte Reduzierung des Schadstoffausstoßes zu erreichen.

[110] Vgl. NOW - Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechologie (2013), S.5

3.1.41 AP 8500 Entwicklung und Implementierung eines Algorithmus zur Zusammenführung der Analysen nach AP 8.1 - 8.4 und Einbindung weiterer Fahrdaten durch Dritte

Die in den Abschnitten 3.1.37 und 3.1.38 aufgeführten Lösungsvarianten zur zielgerichteten Auswahl von Fahrzeugkonzepten stützen sich im Wesentlichen auf die objektive Datengrundlage, die im Rahmen des Forschungsprojektes erhoben worden ist, sowie subjektiv festzulegende Randbedingungen. Als Schnittstelle zum Nutzungsverhalten des Anwenders treten dabei vorrangig die aufgenommenen Geschwindigkeitsprofile der Projektfahrzeuge auf. Anhand dieser kann mit Hilfe einer Verbrauchssimulation abgewogen werden, ob alle in Betracht zu ziehende Antriebsvariationen das gewünschte Fahrverhalten befriedigen können. Ist dies nicht der Fall, so kann die Schar an potentiellen Lösungsalternativen reduziert werden. Die in den zuvor angedeuteten Abschnitten beschriebenen Lösungsansätze befinden sich zum derzeitigen Zeitpunkt in der Konzeptionierungs- bzw. Erprobungsphase. In weiteren Arbeiten wird die Anbindung des Optimierungswerkzeugs an das existierende TCO-Werkzeug angestrebt.

Um eine Auswertung des Nutzungsverhaltens über die Grenzen des Forschungsprojektes hinaus zu ermöglichen, bedarf es der Festlegung einer standardisierten Datenstruktur dieser Geschwindigkeitsprofile. Nur durch die Gültigkeit einer standardisierten Dateistruktur kann eine allgemeine Anwendbarkeit gewährleistet werden. Als Lösungsvariante wurde im Zuge dieses Arbeitspaketes das Dateiformat „CSV“ ausgewählt und als nutzbares Eingangsdatenformat implementiert. Für jede aufgezeichnete Fahrt wird eine solche Datei hinterlegt, wobei die Informationen innerhalb der Datei spaltenförmig strukturiert sind. Die wesentlichen Nutzinformationen stellt ein aufgezeichnetes Geschwindigkeitsprofil in Meter pro Sekunde mit einer eindeutigen Zuordnung eines Zeitstempels dar. Die Datenrate sollte sich dabei an der Messrate von 1 Hz, die im Zuge dieses Forschungsprojektes zur Aufzeichnung der Positionsdaten und Geschwindigkeiten verwendet wurde, orientieren. Neben den zuvor aufgeführten Informationen gehen weiterhin die Präferenzen und Restriktionen des Drittnutzers in das Optimierungsmodell mit ein. Diese müssen vorab vom Nutzer des Werkzeugs übermittelt werden. Der schematische Ablauf dieses Vorgangs ist in Abbildung 196 dargestellt.

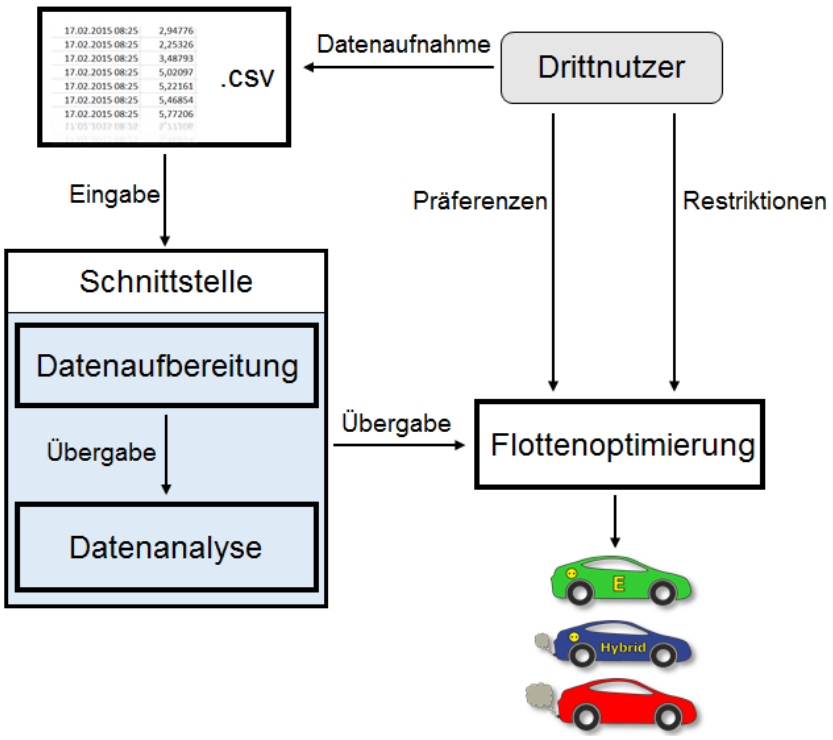


Abbildung 196: Schematischer Ablauf der Drittnutzung der implementierten Flottenoptimierung

Bei Bereitstellung der zuvor aufgeführten Informationen in dem angesprochenen Dateiformat, kann eine Einbindung der Fahrdaten Dritter in das implementierte Lösungskonzept, welches in Abschnitt 3.1.38 beschrieben wird, vollzogen werden. Auf Grundlage der ermittelten Fuhrparkzusammensetzung kann in zukünftigen Schritten dem Drittnutzer eine ausführliche Bewertung seines Fuhrparks z.B. in Form einer Broschüre bereitet werden.

4 Darstellung wesentlicher Abweichungen zum Arbeitsplan

AP Nummer	Beschreibung		2014				2015				2016				2017			
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
AP 2200	Verbauanalyse, Messtechnikdefinition, -konfiguration und -test sensorbasierte Datenlogger Flotte																	
AP 2310	Datenübertragung und -haltung sensorbasierte Datenlogger und Smartphones																	
AP 2400	Datenlogging mit Smartphones																	
AP 4000	Entwicklung Untersuchungsmethodik für die ermittelten Forschungsfragen bezüglich Nutzerforschung Flottenkunden, Flottenmanager und Car-Sharing-Kunden																	
AP 4100	Flottenbefragung zur Ermittlung des ökologisch optimierten Flotten-Mix von Flottendienstleistern und –betreibern zur Klassifikation unterschiedlicher Flottentypen (Uni Duisburg Essen)																	
AP 4110	Experteninterviews zur Typisierung der Grundgesamtheit und Definition eines Sets unterschiedlicher Flottentypen anhand trennscharfer Merkmale																	
AP 4120	Eingrenzung der Grundgesamtheit und Durchführung der Clusterung																	
AP 4200	Ermittlung flottenspezifischer Fahrzeuganforderungen und Nutzerpräferenzen durch Vorbefragungen sowie deren Abgleich mit den elektrifizierten Antriebskonzepten für eine effiziente Verteilung der Fahrzeuge in der Feldphase																	
AP 4300	Kundenincentivierung																	
AP 4400	Durchführung begleitender Befragungen der Fuhrparknutzer und Flottenmanager																	
AP 4410	Erhebung der subjektiven Daten durch die Feldphase begleitende Nachbefragungen der Fuhrparknutzer																	
AP 4420	Erhebung der subjektiven Daten durch die Feldphase begleitende Nachbefragungen der Flottenmanager																	
AP 4430	Zusammenführung und Konsolidierung der gesammelten subjektiven Daten																	
AP 4500	Statistische Auswertung der subjektiven Daten aus den begleitenden Befragungen inklusive des Abgleichs mit objektiven Daten der Feldphase																	

AP 4510	Analyse der subjektiven und objektiven Daten aus den begleitenden Befragungen und der Feldphase																			
AP 4520	Prüfende Bestandsaufnahme und Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Entwicklung des Modells zur Ermittlung des ökologisch optimierten Flotten-Mix																			
AP 4600	Entwicklung und Anwendung eines flottenspezifischen Modells für einen ökologisch optimierten Flotten-Mix																			
AP 4610	Grundlegende Konzeption des Modellrahmens eines flottenspezifischen Tools für einen öklogisch optimierten Flotten-Mix																			
AP 4620	Flottenspezifische Modellschätzung und Anwendung des Tools im Rahmen eines Workshops für Flottenbetreiber und –dienstleister																			
AP 4700	Modellbasierte Prognosen auf der Basis von Szenario-Analysen mit verschiedenen umwelttechnischen und fahrzeugspezifischen Rahmenbedingungen																			
AP 5100	Fahrzeugaufrüstung																			
AP 5110	Fahrzeugaufrüstung sensorbasierte Datenlogger																			
AP 5200	Bereitstellung und Konfiguration von Smartphones																			
AP 5300	Aufbau und Bereitstellung zusätzlicher Datenlogger																			
AP 5500	Fahrzeugabrüstung																			
AP 5510	Fahrzeugabrüstung sensorbasierte Datenlogger																			
AP 6000	Rohdatenfilterung, -aufbereitung, -monitoring und –validierung und -auswertung																			
AP 6100	Monitoring Datenübertragung und Validierung																			
AP 6110	Monitoring Datenübertragung und Validierung sensorbasierte Datenlogger und Smartphones																			
AP 6200	Entwicklung und Durchführung Rohdatenfilterung und –konvertierung																			
AP 6210	Entwicklung und Durchführung Rohdatenfilterung und –konvertierung sensorbasierte Datenlogger und Smartphones																			
AP 6400	Definition, Entwicklung, Erweiterung und Durchführung von Auswertungen, sensorbasierte Datenlogger und Smartphones																			
AP 6500	Aufbau von Modellen zum Monitoring von Fahrzeugen, die nicht vollständig messtechnisch ausgestattet sind, um den Einsatz von Messtechnik auf das notwenige Maß zu beschränken																			

AP 6600	Simulationsgestützte Auswertung der gesamten Projektflotte zur Verbreiterung der Datenbasis	
AP 8000	Bereitstellung von Werkzeugen zur Ermittlung optimaler Fahrzeugkonzepte für unterschiedliche Nutzergruppen (IMECH)	
AP 8100	Entwicklung eines Werkzeugs zur Ermittlung optimaler Fahrzeugkonfigurationen für unterschiedliche Nutzergruppen	
AP 8200	Entwicklung eines Werkzeugs zur Bestimmung der optimalen Zusammensetzung von Fahrzeugflotten hinsichtlich der Antriebskonzepte unter Berücksichtigung unternehmensspezifischer und umweltrelevanter Randbedingungen	
AP 8300	Ableitung praxisgerechter Fahrzyklen für BEV und PHEV aus den Flottenergebnissen	
AP 8400	Definition und Analyse von Zukunftsszenarien und Bewertung hinsichtlich Umwelt, Ökonomie und Technik	
AP 8500	Entwicklung und Implementierung eines Algorithmus zur Zusammenführung der Analysen nach AP 8.1 - 8.4 und Einbindung weiterer Fahrdaten durch Dritte	
	Legende	Ursprünglicher Zeitplan / Neuer Zeitplan nach Aufstockung

Während des gesamten Projektzeitraums sind keine signifikanten Abweichungen von der ursprünglichen bzw. der im Rahmen der Fördermittelaufstockung vereinbarten Arbeits- und Kostenplanung eingetreten. Bedingt durch einen erhöhten Aufwand zur Terminierung und Anreise zum Verbau der Datenlogger in die Projektfahrzeuge, war eine zeitliche und inhaltliche Anpassung der Fahrzeugauf- und abrüstung mit den entwickelten Datenloggersystemen (Arbeitspakete 5110 und 5510) notwendig. Dabei verlängerte sich die Bearbeitungszeit für das Arbeitspaket 5110 bis zum vierten Quartal 2016 und für das Arbeitspaket 5510 bis zum Projektende. Aufgrund der Tatsache, dass der Großteil der entwickelten Datenlogger dezentral bei den Projektteilnehmern verbaut werden musste, konnten 196 anstelle der ursprünglich geplanten 300 Flottenfahrzeuge vermessen werden. Diese lieferten eine breite Datenbasis, welche die methodische Forschung uneingeschränkt ermöglichte. Weiterhin ergab sich aus dem Auftreten von defekten Datenlogger-Systemen (z.B. Korrosionsschäden) ein erhöhter Reparaturaufwand, der zeitlich neben der Organisation und Umsetzung der zuvor angesprochenen Auf- und Abrüstung vollzogen werden musste. Durch den zahlreichen Einsatz der Flottenfahrzeuge durch die Projektteilnehmer musste die Performance und die Speicherkapazität der bestehenden Serverinfrastruktur im vierten Quartal 2016 verbessert werden, so dass ein neues, leistungsfähigeres Serversystem erworben und integriert worden ist. Der zeitliche Verzug, der sich aus der Anpassung der IT-Serverstruktur und der Datenübertragung ergab, verlangsamte die

Auswertungen der aufgenommenen Fahrdaten. Dementsprechend verlängerte sich die Datenübertragung der Messdaten, die Durchführung der Rohdatenfilterung sowie deren Auswertung (AP 6) bis zum Ende des zweiten Quartals 2017. Aufgrund des erhöhten Arbeitsaufwandes in dem AP 6 verzögerte sich der Beginn des AP 8, so dass die Bearbeitung dieses Arbeitspaketes zum Ende des 4. Quartals 2016 begonnen wurde. Die Erhöhung des Fördervolumens für Projektfahrzeuge führte zur Aufstockung der Mittel der Universität Duisburg-Essen mit dem Zuwendungsbescheid vom 22.07.2015. Mit der dadurch höheren Anzahl an Projektteilnehmern verlängerte sich die Bearbeitung der Arbeitspakete 4400, 4500, 4600 und 4700 gegenüber der ursprünglichen Arbeitsplanung um 2 bis 4 Quartale.

5 Vergleich der Projektergebnisse zum internationalen Stand der Technik

Das Ziel des Vorhabens war es, Erkenntnisse zu bedürfnisorientierten Fahrzeugausprägungen zu erzielen, um eine zunehmende Verbreitung der Elektromobilität in Flotten erreichen zu können. Die wissenschaftliche Begleitforschung hat wichtige Erkenntnisse geliefert, anhand derer zielgerichtete Handlungsempfehlungen für verschiedene Stakeholder der Elektromobilität ableitbar sind. Wie die Analyse am Projektende zeigt, sind in vielen Problembereichen zwischenzeitlich Aktivitäten zu verzeichnen.

Wie die Befragungsergebnisse demonstrieren, sind nur zwischen 3% und 8% der Auskunftspersonen mit der Flexibilität ihres Elektroautos voll und ganz zufrieden. Zur Steigerung der Flexibilität bieten sich verschiedene technische Verbesserungen in den kundenwahrnehmbaren Dimensionen Reichweite, Ladeinfrastruktur und Ladezeiten an.

Zur Erhöhung der Flexibilität favorisieren 48% der befragten Flottenbetreiber die Verwendung größerer Traktionsbatterien in den Elektrofahrzeugen, selbst wenn dadurch längere Ladezeiten notwendig werden. Die durch Befragungen der Auskunftspersonen ermittelten optimalen realen Reichweiten für den Einsatz von Elektrofahrzeugen im Betriebsalltag bewegen sich um 200 Kilometer nach Vollladung bei mittleren Außentemperaturen (10 bis 20 °C). Der Bereich akzeptabler Reichweiten weist über alle 3 Gruppen von Auskunftspersonen eine obere Grenze von effektiv 300 Kilometern nach Vollladung aus. Die neueste Generation von Elektrofahrzeugmodellen erreicht laut Herstellerangaben nach Vollladung tatsächlich effektive Alltagsreichweiten von knapp 200 km bis maximal 300 km.[111] Insofern haben sich die gebotenen Alltagsreichweiten den Bedürfnissen der Auskunftspersonen im Berufsalltag sukzessive angenähert.

Die wichtigste Maßnahme zur Flexibilitätserhöhung bildet aus Sicht von knapp 20% der Flottenbetreiber eine besser ausgebaute öffentliche Ladeinfrastruktur. Von den befragten Dienstwagennutzern favorisieren sogar 30% diese Maßnahme. Die Befragungsergebnisse zeigen eindeutig, dass mehr Ladeinfrastruktur sowohl an öffentlichen Plätzen innerorts als auch an Fernverkehrsstraßen gewünscht wird. Laut der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) gibt es 2017 10.700 öffentlich zugängliche Ladepunkte, wovon 530 eine Schnellademöglichkeit bieten.[112] Die Bundesregierung sollte sich daher in ihren Bemühungen zum weiteren Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur durch die Projektergebnisse bestätigt sehen. Das seit März 2017 laufende Förderprogramm des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), das den Aufbau von Schnelladepunkten und Normalladepunkten subventioniert, scheint vor diesem Hintergrund gerechtfertigt.[113] Der Anzahl von Schnellladestationen sollte dabei besonderes Augenmerk geschenkt werden, denn rund 20% der Flottenbetreiber sprechen sich für kürzere Ladezeiten als wichtigsten Ansatzpunkt zur Verbesserung der Flexibilität von Elektrofahrzeugen aus.

[111] Vgl. BMW Group (2017), Renault Deutschland AG (2017)

[112] Vgl. NPE (2017)

[113] Vgl. BMVI (2017)

Von vielen Auskunftspersonen wurde die verfügbare öffentliche Ladeinfrastruktur auch wegen ihrer Uneinheitlichkeit (Anschlüsse, Bezahlsysteme, Ladekarten u.a.) gerügt. Von den Auskunftspersonen gewünscht ist daher ein universeller Zugang zur existierenden öffentlichen Ladeinfrastruktur. Die von der NPE unter dem Begriff „eRoaming“ gefassten Maßnahmen zum Laden an Ladepunkten unterschiedlicher Betreiber sollten weiter zügig vorangetrieben und kommuniziert werden.[114]

Neben dem Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur halten 38% der Flottenbetreiber eine staatliche Kaufprämie für eine geeignete Maßnahme, um die Rahmenbedingungen für Elektrofahrzeuge effektiv zu verbessern. Damit liegt die Kaufprämie deutlich vor anderen Fördermaßnahmen wie etwa der Anrechnung der Batteriekapazität bei Elektro-Dienstwagen (8%) oder der Nutzung von Busspuren (6%). Diesem Wunsch der Flottenbetreiber ist die Bundesregierung bereits im letzten Drittel der Projektlaufzeit nachgekommen.[115] Die Mehrzahl der Berechnungen mit dem entwickelten TCO-Modell hat gezeigt, dass aus heutiger Sicht eine Förderung über das Jahr 2020 hinaus notwendig sein könnte.

Ein spezielles Problem während der Projektlaufzeit bildete Abrechnung bzw. Vergütungen des privat geladenen Stroms bei Dienstwagennutzern: Bis zur Mitte der Laufzeit des Vorhabens war ein Gegenstück zur üblichen Tankkarte nicht verbreitet. Mittlerweile bieten spezialisierte Anbieter intelligente Servicelösungen an, um Flottenbetreibern und Dienstwagennutzern eine automatisierte Abrechnung aus einer Hand zu bieten, auch dann, wenn Dienstwagennutzer privat zu Hause laden.[116]

[114] Vgl. NPE (2015)

[115] Vgl. Bundesregierung (2016c)

[116] Vgl. The Mobility House (2017)

6 Zukunftsaussichten und weiterer F&E-Bedarf

Wie die Befragungen der Universität Duisburg-Essen gezeigt haben, planen 71% der am Vorhaben teilnehmenden Flottenbetreiber in den kommenden drei Jahren neue Elektroautos anzuschaffen. Für die eigene Flotte gehen die Befragten im Durchschnitt von einem Anstieg des Anteils von Elektrofahrzeugen (BEV, REX und PHEV) an allen Flottenfahrzeugen von heute 15% auf 35% im Jahr 2020 aus. Unter den Dienstwagennutzern geben 68% an, dass ihr nächster Dienstwagen ein Elektrofahrzeug sein wird. Auf Basis der gesammelten Ergebnisse ist davon auszugehen, dass die Bedeutung von Elektrofahrzeugen in Flotten weiter rasch zunehmen wird.

Während der Kunden-Incentivierung waren nur wenige Plug-In-Hybridmodelle für Marktnischen verfügbar. Entsprechend sind nur vereinzelt PHEV-Modelle in die untersuchten Stichproben eingegangen. Die Pläne der Fuhrparkleiter zeigen, dass die in den kommenden 3 Jahren anzuschaffenden Elektrofahrzeuge zu etwa 30% PHEV-Modelle sein werden. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, die energiewirtschaftlichen und umwelttechnischen Auswirkungen einer großen Zahl von PHEV-Modellen in Flotten gesondert zu untersuchen.

Folgende Forschungsfrage ist in diesem Kontext in der Zukunft zu beantworten:

- Wie würde ein höherer Anteil von Plug-In-Hybriden die erzielten Ergebnisse beeinflussen?

Mit der Teilnahme am Vorhaben bot sich für die Mehrheit der Flottenbetreiber erstmals die Möglichkeit mit Elektrofahrzeugen in Kontakt zu kommen und diese auf ihre Alltagstauglichkeit zu testen. Entsprechend wurden überwiegend pro Flotte nur wenige Fahrzeuge beschafft. Nach mehrmonatigem Einsatz der Projektfahrzeuge geben 20% der befragten Flottenbetreiber an, dass ihre Flottennutzer theoretisch sämtliche Fahrten mit Elektrofahrzeugen bewältigen könnten. Ebenfalls 20% geben an, dass sie in den kommenden 3 Jahren voraussichtlich nur Elektroautos anschaffen und auf neue Verbrenner-Modelle völlig verzichten werden. Es ist davon auszugehen, dass in den kommenden Jahren vermehrt größere Anteile der Flotten (teil-)elektrifiziert werden. Künftige Vorhaben sollten daher die Elektrifizierung eines größeren Anteils von Flottenfahrzeugen oder der gesamten Flotte wissenschaftlich begleiten. Mit dem höheren Anteil von Elektrofahrzeugen gewinnen Forschungsfragen zu Themen wie Gesamtbetriebskosten, betriebliches Energiemanagement, Lastspitzen etc. im Vergleich zu diesem Vorhaben an Bedeutung.

Folgende Forschungsfrage ist in diesem Kontext in der Zukunft zu beantworten:

- Kann eine Flotte vollständig auf Elektroautos umgestellt werden und wie sollte die Umsetzung konkret erfolgen?

Das in diesem Vorhaben entwickelte Tool zur Abbildung der Gesamtbetriebskosten verschiedener Antriebskonzepte sollte weiterentwickelt werden, um sie Praktikern als Entscheidungshilfe bei der Anschaffung neuer Firmenfahrzeuge zur Verfügung stellen zu können. Nach der Überführung in eine Anwendungssoftware könnte eine grafische Benutzerschnittstelle die Bedienung erleichtern. Weiterhin sollte eine Fahrzeugliste implementiert werden, sodass mehrere Fahrzeugmodelle gewählt und verschiedene

fahrzeugmodellspezifische Parameter zur individuellen Modellierung der Auswahlentscheidung herangezogen werden können. Die Fahrzeugliste könnte z.B. die meistverkauften ICEV-, BEV-, REX- und PHEV-Modelle enthalten.

Um einen weiteren Mehrwert für Praktiker zu erzielen, sollte die Möglichkeit zur Eingabe flotteneigener Zielfunktionen bestehen. Denn wie die Befragungen des Vorhabens gezeigt haben, beeinflussen neben den Kosten auch die wahrgenommene Umweltwirkung, Alltagstauglichkeit und das Image die Beschaffungsentscheidung von Flottenfahrzeugen. Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführte Conjoint-Analyse bietet hierfür einen sinnvollen Ansatz, wobei die bisher generierten Ergebnisse mit einer flottenrepräsentativen Stichprobe kritisch zu überprüfen wären.

Wie sich gezeigt hat, sind die Kosten für betriebliche Ladeinfrastruktur aktuell nur schwer erfassbar. Die lokalen Voraussetzungen (bspw. Parkplatzsituation, angeschaffte Hardware, Netzanschluss, Absicherung) und das Commitment zum Thema Elektromobilität (Anzahl der angeschafften Elektroautos, Investitionsbereitschaft in Infrastruktur) sind von Flottenbetreiber zu Flottenbetreiber sehr unterschiedlich. Mit zunehmender Elektrifizierung der Flotten dürfte das Thema an Bedeutung gewinnen. Bei der Betrachtung des Medians der zusätzlichen Kosten je Elektroauto ergeben sich Werte um 2000€ für Flottenbetreiber mit Wallboxen oder Ladesäulen. Die Infrastrukturkosten sollten demnach adäquat in das TCO-Tool einbezogen werden.

Anhand des entwickelten TCO-Tools und den zusätzlich gesammelten Flottenkennzahlen (Kaufrate, Anzahl von Firmen-Pkw etc.) können Hochrechnungen des künftigen Antriebs-Mix für die Stichprobe angestellt werden. Sofern eine Hochrechnung für den gesamten relevanten Flottenmarkt durchgeführt werden soll, ist die Bildung einer für den relevanten Flottenmarkt repräsentativen Stichprobe notwendig.

Das entwickelte TCO-Tool geht von der Prämisse aus, dass mit Elektrofahrzeugen alle Fahrten erfüllt werden können. Wie die Ergebnisse der Befragungen aber zeigen, trifft diese Prämisse in der Realität nur für 20% der befragten Flottenbetreiber und –nutzer zu. Zur Modellierung dieser Restriktion ist die Einbeziehung von objektiven Fahrdaten in die Beschaffungsentscheidung mittels der Flottenoptimierung denkbar. Anhand gezielter simulationsgestützer Analysen auf Grundlage des persönlichen Fahrverhaltens kann die Nutzbarkeit von Elektrofahrzeugen bewertet werden. So könnten etwa die Gesamtbetriebskosten nur für solche Antriebsarten berechnet und verglichen werden, die das erhobene Nutzungsprofil hinreichend abdecken können.

Folgende Forschungsfragen sind in diesem Kontext in der Zukunft zu beantworten:

- Wie lassen sich modellspezifische Parameter in das TCO-Tool einbauen?
- Wie können Ladeinfrastrukturkosten erhoben und mit dem TCO-Tool verbunden werden?
- Wie ist die Übertragung der TCO-Ergebnisse in Form einer Hochrechnung für den gesamten relevanten Flottenmarkt möglich?
- Wie lassen sich die objektiven Fahrdaten (Flottenoptimierung) mit dem TCO-Tool bestmöglich verbinden?

Wie aus den Auswertungen des Ladungsbedarfs hervorgeht, bewirkt die zumeist unbekannte Variable Umwelt temperaturabhängig Reichweiteneinbußen von bis zu 50%. Diesem äußeren Einfluss auf das System Elektrofahrzeug muss durch ausgereifte technische Maßnahmen, wie einer geeigneten Vorkonditionierung der Fahrzeuge, entgegengewirkt werden.

Folgende Forschungsfragen sind in diesem Kontext in der Zukunft zu beantworten:

- Wie kann das Wärmemanagement im Elektrofahrzeug weiterhin verbessert werden?
- Wie weit im Vorfeld einer Fahrt sollte eine Vorkonditionierung sinnvollerweise beginnen?
- Welcher Reichweitengewinn sollte durch eine Vorkonditionierung erreicht werden, um die Nutzerzufriedenheit hinsichtlich einer temperaturunabhängigen Reichweite zu garantieren?
- Wie kann ein intelligenter Kompromiss zwischen elektrischer Leistung zur Vorkonditionierung und Ladeleistung aussehen, wenn die Traktionsbatterie noch nicht vollgeladen ist?
- Wie wirken sich die energetischen Anforderungen einer Vorkonditionierung neben der eigentlichen Ladeleistung auf das elektrische Netz aus?

Auf Grundlage der vermessenen Tagesfahrleistungen und Ergebnisse aus den Befragungen lassen sich z.B. Richtwerte für die Entwicklung von alltagstauglichen, standardisierten Traktionsbatterien für die Forschung und Entwicklung ableiten. Diese vereinheitlichten Batterien würden z.B. ein Ladeszenario, in dem entladene Traktionsbatterien ausgetauscht anstatt geladen werden, vereinfachen.

Folgende Forschungsfragen sind in diesem Kontext in der Zukunft zu beantworten:

- Welche Kapazitäten der Traktionsbatterie sind künftig notwendig, um die vermessenen Tagesfahrleistungen bewältigen zu können. Welche sind notwendig um die Nutzer zufriedenzustellen?
- Können Traktionsbatterien standardisiert gezielt auf festgelegte Tagesfahrleistungen zugeschnitten werden?
- Kann die Produktion von standardisierten Traktionsbatterien die Erwerbskosten der Elektrofahrzeuge zielgerichtet senken?
- Können die wirtschaftlichen und logistischen Vorteile von standardisierten Traktionsbatterien auch die Ladeinfrastruktur positiv beeinflussen?

7 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)

Um eine zunehmende Verbreitung der Elektromobilität in Deutschland erreichen zu können, müssen elektrifizierte Fahrzeuge für möglichst viele Anwender attraktiv sein. Es gilt daher, die Attraktivität von Elektrofahrzeugen im Sinne des Kundenwertes zu maximieren. Dies gelingt wiederum nur, wenn bedürfnisorientierte Pfade hinsichtlich der Fahrzeugausprägungen eingeschlagen werden. Anbieter müssen vorhandene Marktpotenziale identifizieren und auf dieser Basis eine sinnvolle Einordnung elektrifizierter Fahrzeuge in ihr Portfolio vornehmen können.

Die Kenntnis des realen Fahr- und Nutzungsverhaltens solcher Fahrzeuge ist unabdingbar, um Kunden maximal effiziente Fahrzeuge anbieten zu können, wodurch die nötige Kundenakzeptanz und damit Marktdurchdringung erreicht wird.

Mit dem Teilvorhaben bot sich die Möglichkeit, das reale Fahr- und Nutzungsverhalten im Flottenkontext mit einer großen Zahl von Fahrzeugen und Anwendern über eine mehrjährige Feldphase erfassen zu können. Im Einzelnen wurden umfangreichen Daten zu folgenden Themenkreisen erhoben:

- Ermittlung des realen Energieverbrauchs repräsentativer Fahrer verschiedener elektrifizierter serienreifer Fahrzeugkonzepte beim Einsatz im Arbeitsalltag.
- Aufteilung des Energieverbrauchs nach vorherrschende Verkehrslage, relevanten Umweltbedingungen, Nutzungskontext, Nebenaggregate, u.v.m.
- Abbildung des repräsentativen Nutzungsverhaltens von Elektrofahrzeugen.
- Marktakzeptanz: Ausweisen kundenwahrnehmbarer Fahrzeughaltungsparameter wie Cost of Ownership, Beurteilung der Mobilität, Flexibilität (Utility Faktor, Anteil abdeckbarer Fahrten etc.), Fahrerlebnis u.v.m.
- Zusammenführung der objektiven Parameter mit den subjektiven Akzeptanzkriterien.
- Untersuchung des wahrgenommenen, subjektiven Kunden- bzw. Anwendernutzens im Flottenkontext.
- Anforderungen von Flottenbetreibern an die Ladeinfrastruktur: Ladeorte, Ladehäufigkeit, Tageszeiten der Ladevorgänge, geladene Energiemengen.
- Technische Lösungsansätze, um den umweltbedingten Energieverbrauch der Elektrofahrzeuge zu reduzieren.

8 Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses

Zott, Viktoria, Kannstätter, Timm, Klein, Andreas, Kain, Andreas und Keinath, Andreas. 2015. *Elektromobile Fuhrparks – Ein Blick auf die Vorreiter.* In: Neue Mobilität. Das Magazin vom Bundesverband eMobilität, 6. Jg. 2015, Heft 17, S. 68-71.

Koppers, Martin, Tewiele, Sarah und Schramm, Dieter. 2016. *Identifikation der Energieverteilung von Fahrantrieb und Nebenaggregaten in realen Fahrprofilen im Flottenbetrieb.* Dortmund: VDE Verlag GmbH, 2016. S. 111-116, Beiträge der 7. GMM-Fachtagung. ISBN: 978-3-8007-4167-0.

Koppers, Martin, Driesch, Patrick und Schramm, Dieter. 2017. *Simulationsgestützte Analyse verschiedener (teil)- elektrifizierter Antriebsvarianten für PKW unter realen Betriebsbedingungen.* Dortmund: VDE Verlag GmbH, 2017. S. 159-164, GMM-Fachbericht 87. ISBN: 978-3-8007-4369-8.

Blume, Sebastian, Reicherts, Sebastian, Driesch, Patrick, Schweig, Stephan und Schramm, Dieter. 2017. *Identifizierung von Range Extender Fahrten anhand von realen Bewegungsprofilen durch künstliche neuronale Netze.* Duisburg: Wissenschafts-Forum „Mobility and Digital Transformation – Challenges and Future Paths“, 2017.

Schüller, Mira. *Technisch optimale Auslegung von Elektrofahrzeugen für Nutzergruppen in China und Deutschland – eine vergleichende Untersuchung*. (Unveröffentlicht)

Koppers, Martin. *Ein methodischer Ansatz zur nutzerspezifischen Bewertung von (teil-)elektrischen Fahrzeugkonzepten*. (Unveröffentlicht)

9 Literaturverzeichnis

ACEA. (2016a). ACEA Tax Guide. Retrieved 12.11.2016, from http://www.acea.be/uploads/news_documents/ACEA_TAX_GUIDE_2016.pdf

ACEA. (2016b). OVERVIEW OF PURCHASE AND TAX INCENTIVES FOR ELECTRIC VEHICLES IN THE EU IN 2016. Retrieved 12.11.2016, from https://www.acea.be/uploads/publications/Electric_vehicles_overview_2016.pdf

ADAC (Producer). (2013). Autotest | BMW i3 - ADAC. [Dokument] Retrieved from https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5053_BMW_i3/BMW_i3.pdf

ADAC. (2014). ADAC Autotest - VW e-Golf. . Retrieved 09.02.2017, from https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5134_VW_e_Golf/VW_e_Golf.pdf

ADAC. (2015). ADAC Autotest - VW Golf GTE DSG. Retrieved 27.05.2017, from https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5233_VW_Golf_GTE_DSG/VW_Golf_GTE_DSG.pdf

ADAC. (2016a). Autodaten & Autokosten. VW e-Golf. Retrieved 24.11.2016, from https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/detail.aspx?KFZID=240387&info=VW+e-Golf+

ADAC. (2016b). Autodaten & Autokosten. VW Golf 1.6 TDI BMT Trendline. Retrieved 24.11.2016, from https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/detail.aspx?KFZID=240900&info=VW+Golf+1.6+TDI+BMT+Trendline

ADAC. (2017b). Autkosten VW Golf GTE DSG. Retrieved 21.07.2017, from https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokosten/detail.aspx?KFZID=266948&activeTab=3&info=VW+Golf+GTE+DSG

ADAC Autokosten. (2017). Profi-Autokostenrechner. Retrieved 21.07.2017, from https://www.adac-autokosten.de/

ADAC Autokosten (Producer). (2017a, 26.10.2017). Berechnungsgrundlagen für die standardisierte Kostenberechnung. Retrieved from https://www.adac.de/_mmm/pdf/autokosten_grundlagen_47084.pdf

Autobild. (o.J.a.). So schnell verliert Ihr Neuwagen an Wert. Retrieved 17.01.2017, from http://www.autobild.de/bilder/so-schnell-verliert-ihr-neuwagen-an-wert-5295083.html

Autobild. (o.J.b.). EurotaxSchwacke Wertverlust-Prognose. Retrieved 17.01.2017, from http://www.autobild.de/bilder/eurotaxschwacke-wertverlust-prognose-318133.html

Backhaus, K., & al., e. (2011). *Multivariate Analysemethoden*. Berlin Heidelberg: Springer.

Blume, S., Reicherts, S., Driesch, P., & Schramm, D. (2017). Identifizierung von Range Extender Fahrten anhand realer Bewegungsprofile durch künstliche neuronale Netze. Duisburg: 9. Wissenschaftsforum Mobilität.

BMVI. (2017). Ladesäulenoffensive. Retrieved 08.06.2017, from https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2017/019-dobrindt-e-ladesaeulenoffensive.html

BMW Group (Producer). (2010). Technische Daten BMW 1er 116d,118d.

BMW Group (Producer). (2016). Der BMW i3. [Datenblatt]

BMW Group. (2017). Schneller weiter fahren. Mit Kraft und Energie. Reichweite, Laden & Effizienz des neuen BMW i3. Retrieved 23.10.2017, from http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2017/reichweite-laden-effizienz.html

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. (2012). Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO). Anlage VIII (§ 29 Absatz 1 bis 4, 7, 9, 11 und 13). Untersuchung der Fahrzeuge. Retrieved 24.11.2016, from http://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/anlage_viii.html

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (Producer). (2014, 20.10.2017). Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz- EEG 2017). Retrieved from http://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2017.pdf

Bundesministerium für Finanzen. (o.J.). Kfz-Steuerrechner. Retrieved 09.02.2017, from http://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Service/Apps_Rechner/KfzRechner/KfzRechner.html

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (2017). colognE-mobil - Elektromobilitätslösungen für NRW. from http://cologne-mobil.de/

Bundesregierung, D. (2016c). Förderung für Elektroautos beschlossen. Retrieved 11.10.2017, from https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2016/04/2016-04-27-foerderung-fuer-elektroautos-beschlossen.html

CAR Universität Duisburg-Essen. (2015). So haben sich die Durchschnittspreise bei Neuwagen entwickelt. . Retrieved 24.02.2017, from https://www.uni-due.de/~hk0378/publikationen/2015/20150819_Focus-Online.pdf

ChenYang Technologies GmbH & Co. KG (Producer). (2016). Split Core Hall Effect DC Current Sensor CYHCT-C2TV. Retrieved from http://www.cy-sensors.com/CYHCT-C2TV.pdf

Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. (Producer). (2013). Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258.

Die Bundesregierung. (2016a). Verbesserte Förderung von Elektrofahrzeugen. Retrieved 02.02.2017, from https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Infodienst/2016/05/2016-05-18-elektromobilitaet1/2016-05-18-elektromobilitaet.html

Die Bundesregierung. (2016b). Einigung auf Kaufprämie für E-Autos. Retrieved 27.07.2017, from https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2016/04/2016-04-27-foerderung-fuer-elektroautos-beschlossen.html

Die Bundesregierung. (2016c). Weitere Steuervorteile für Elektroautos. Retrieved 23.05.2017, from https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2016/05/2016-05-18-elektromobilitaet.html

Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. (2011). Wärmemanagement von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb *Porsche Engineering Magazin*.

ecomento (Producer). (2013, 14.05.2017). ecomento.de. *Das Elektroauto- & E-Mobilitäts-Portal*. Retrieved from https://ecomento.de/wp-content/uploads/2013/04/BMW-i3-Technik-740x425.jpg

Eurostat. (2016). Strompreise nach Art des Benutzers. Retrieved 24.01.2017, from http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=de&pcode=ten00117

Ford-Werke GmbH. (2016). colognE-mobil II - Elektromobilitätslösungen für NRW, Schlussbericht. Köln.

Fraunhofer IAO (Producer). (2012, 20.10.2017). Szenarios zur Elektromobilität 2025. Retrieved from http://wiki.iao.fraunhofer.de/images/studien/szenarios-elektromobilitaet-2025.pdf

Fraunhofer ISI. (2014). Markthochlaufszenarien für Elektrofahrzeuge. Retrieved 23.01.2017, from http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/Fraunhofer-ISI-Markthochlaufszenarien-Elektrofahrzeuge-Langfassung.pdf

Galgamuwa, U., Perera, L., & Bandara, S. (2015). Developing a General Methodology for Driving Cycle Construction. Comparison of Various Established Driving Cycles in the World to Propose a General Approach. *JTTs*.

Handelsblatt. (2015). Elektroauto-Boom dank staatlicher Förderung. Retrieved 12.11.2016, from http://www.handelsblatt.com/auto/nachrichten/norwegen-elektroauto-boom-dank-staatlicher-foerderung/12211510.html

Hölzle, S. (2014). Erstellung eines Gewichts- und Kostenmodells für serielle Hybridfahrzeuge zur Berechnung der Total Cost of Ownership in Abhängigkeit unterschiedlicher Nutzungsprofile. . *Universität Duisburg-Essen*.

Hung, W. T., Tong, H. Y., Lee, C. P., & Pao, L. Y. (2007). Development of a practical driving cycle construction methodology. A case study in Hong Kong. *Transportation Research Part D: Transport and Environment 12*.

ICCT. (2016). Real-world vehicle fuel consumption gap continues to widen in Europe. . Retrieved 23.01.2017, from http://www.theicct.org/news/press-release-europe-real-world-vehicle-fuel-consumption-gap-continues-to-widen

Jeschke, S., Koppers, M., Hirsch, H., & Schramm, D. (2012). HiL Simulation of Electric Vehicles in different Usage Scenarios. In r (Ed.), *Proceedings of the International Electric Vehicle Conference (IEVC)*. Greenville (USA).

Jeschke, S., Koppers, M., Schramm, D., & Hirsch, H. (2013). Investigations on the Impact of different Electric Vehicle Traction Systems in Urban Traffic *Proceedings of the 9th International Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Peking (China).

Kleindorfer, P. R., Neboian, A., Roset, A., & Spinler, S. (2012). Fleet Renewal with Electric Vehicles at La Poste. *Interfaces, 42*, 465-477.

Koppers, M. (Unveröffentlicht). *Ein methodischer Ansatz zur nutzerspezifischen Bewertung von (teil-)elektrischen Fahrzeugkonzepten*.

Koppers, M., Driesch, P., & Schramm, D. (2017). Simulationsgestützte Analyse verschiedener (teil-) elektrifizierter An-triebsvarianten für Pkw unter realen Betriebsbedingungen *Beiträge der 8. GMM-Fachtagung* (pp. 159-164). Dortmund: VDA-Verlag.

Koppers, M., Tewiele, S., & Schramm, D. (2016). Identifikation der Energieverteilung von Fahrantrieb und Nebenaggregaten in realen Fahrprofilen im Flottenbetrieb (pp. 111-116). Dortmund: VDE Verlag GmbH.

Kraftfahrt-Bundesamt. (2017). Verkehr in Kilometern der deutschen Kraftfahrzeuge im Jahr 2016.

Kreyenberg, D. e. a. (2015). *Erneuerbare Energien im Verkehr - Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerba-rer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger.* Berlin.

Kuß, A. (2012). *Marktforschung*. Wiesbaden: Gabler Verlag.

maxim integrated™ (Producer). (2015). DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. Retrieved from https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf

McKinsey & Company. (2017). Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability. Retrieved 10.01.2017, from https://www.mckinsey.de/files/161223_mckinsey_e-vehicles.pdf

Nationale Plattform Elektromobilität (Producer). (2011). Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität.

Neboain, A. e. a. (2011). Fleet renewal with electric vehicles under cost uncertainty. *Vallendar: WHU - Otto Beisheim School of Management.*

Nerling, J., Schaller, F., & Arnhold, O. (2016). Vorkonditionierung von Elektrofahrzeugen zur Reichweitenerhöhung. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 118*(7), 42-47. doi: 10.1007/s35148-016-0061-x

Neudorfer, H., Binder, A., & Wicker, N. (2006). Analyse von unterschiedlichen Fahrzyklen für den Einsatz von Elektrofahrzeugen. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, 123*(7), 352-360. doi: 10.1007/s00502-006-0363-x

Neugebauer, B. (2004). Die Erfassung von Umweltbewusstsein und Umweltverhalten. Retrieved 07.10.2017, from http://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/handle/document/48505/ssoar-2004-neugebauer-Die_Erfassung_von_Umweltbewusstsein_und.pdf?sequence=1

NOW - Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechologie. (2013). Ein Portfolio von Antriebssystemen für Europa: Eine faktenbasierte Analyse. Die Rolle von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen, Plug-in Hybridfahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen.

NPE. (2015). Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland. Retrieved 11.10.2017, from http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_AG3_Statusbericht_LIS_2015_barr_bf.pdf

NPE. (2017). Ladeinfrastruktur. Retrieved 19.10.2017, from http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/themen/ladeinfrastruktur/

Nykvist, B. N., M. (2015). Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Climate Change, 5*, 329-332.

OpenStreetMap. (2017). OpenStreetMap - Deutschland. Retrieved 20.10.2017, from https://www.openstreetmap.de/

Pehnt, M., & Dr. Höpfner, U. (2007). Elektromobilität und erneuerbare Energien. . from http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/Energiebalance_AP5.pdf

Pfriem, M. (2016). *Analyse der Realnutzung von Elektrofahrzeugen in kommerziellen Flotten zur Definition einer bedarfsgerechten Fahrzeugauslegung*: KIT Scientific Publishing.

Proff, H. (2013). *Herausforderungen für das Automotive Engineering & Management. Technische und betriebswirt-schaftliche Ansätze.* Wiesbaden: Springer Gabler.

Renault Deutschland AG. (2017). Renault ZOE: Bis zu 400 km NEFZ* Reichweite. Retrieved 23.10.2017, from https://www.renault.de/modellpalette/renault-modelluebersicht/zoe/Reichweite.html

Rogers, E. (2003). *Diffusion of Innovations*. New York: Simon & Schuster, Inc.

Sachs, L. (2013). *Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden*. Berlin Heidelberg: Springer

Schade, M., Volkens, B., & Krohn, B. (2016). Gebraucht günstiger stromern. Retrieved 17.01.2017, from http://www.autobild.de/artikel/gebrauchtwagenkauf-elektroauto-ratgeber-8626101.html

Schaufenster Elektromobilität. (2016). Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität. Retrieved 23.01.2017, from http://schaufenster-elektromobilitaet.org/media/media/documents/dokumente_der_begleit__und_wirkungsforschung/EP29_Online-Vergleichskostenrechner.pdf

Schaufenster Elektromobilität (Producer). (2017). Minimaldatensets zur Erhebung von Forschungsdaten in der Elektromobilität.

SIMCom. (2013). SIM968 Hardware Design V1.00.
Söllner, F. (2017). Batterie-Experte: Tesla wagt mehr als BMW – und auch Samsung könnte Elektroautos bauen. Retrieved 21.07.2017, from http://www.deraktionaer.de/aktie/batterie-experte--tesla-wagt-mehr-als-bmw---und-auch-samsung-koennte-elektroautos-bauen-308620.html
Statista GmbH. (2014). Entwicklung des Mehrwertsteuersatzes in Deutschland von 1968 bis 2014. Retrieved 17.01.2017, from https://de.statista.com/statistik/daten/studie/164066/umfrage/entwicklung-des-mehrwertsteuersatzes-in-deutschland-ab-1968/
Statista GmbH. (2017). Pkw-Bestand in Deutschland nach Kraftstoffarten (Stand: 1. Januar 2016 und 1. Januar 2017). Retrieved 24.10.2017, from https://de.statista.com/statistik/daten/studie/4270/umfrage/pkw-bestand-in-deutschland-nach-kraftstoffarten/
The Mobility House. (2017). Abrechnungsservice. Retrieved 11.10.2017, from http://www.mobilityhouse.com/de/produkte/abrechnungsservice/#abrechnungsservice-at-home
Thielmann, D. A., Sauer, A., & Wietschel, P. D. M. (2015). Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. *Fraunhofer- Institut für System- und Innovationsforschung*.
Todsen, U. (2012). *Verbrennungsmotoren*: Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG.
Tong, H. Y., Hung, W. T., & Cheung, C. S. (1999). Development of a driving cycle for Hong Kong. *Atmospheric Environment 33*.
TÜV Rheinland. (2016). Auszug aus der Gebührenliste. Retrieved 24.11.2016, from https://www.tuv.com/media/germany/20_mobility/prfstellen/preislisten/2016_Gebuerenliste_NRW-Rld-Pfalz.pdf
TÜV Rheinland. (2017). Information Center, Haupt- und Abgasuntersuchung. Retrieved 21.07.2017, from https://www.tuv.com/de/germanyinfothek/infothek/rund_ums_auto/hauptuntersuchung_abgasuntersuchung/auto/auto.html
Van Westendorp, P. H. (1976). *NSS-Price Sensitivity Meter: A New Approach to Study Consumer Perception of Prices*. Paper presented at the ESOMAR Congress, Venice.
Venghaus, J. (Producer). (2017). Sporthochseeschifferschein Terrestrische Navigation.
Volkswagen AG (Producer). (2015). Der neue e-Golf - Technik und Preise.
WiBe-TEAM. (2016). Wahl des Zinssatzes für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen / WiBe-Projekte. Retrieved 24.02.2017, from http://wibe.de/wahl-des-zinssatzes-fur-wirtschaftlichkeitsuntersuchungen-wibe-projekte/